

**PERSPECTIVAS DE REÚSO AGRÍCOLA DE LODO DE ETE
SUBMETIDO À DIGESTÃO ANAERÓBIA MESOFÍLICA**

Mariana Hammerschmitt Ecco

Orientador: Wanderli Rogério Moreira Leite

2012/2



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL


PERSPECTIVAS DE REÚSO AGRÍCOLA DE LODO DE ETE
SUBMETIDO À DIGESTÃO ANAERÓBIA MESOFÍLICA

MARIANA HAMMERSCHMITT ECCO

Trabalho apresentado à Banca
Examinadora como parte dos
Requisitos para Conclusão do Curso de
Graduação em Engenharia Sanitária e
Ambiental – TCC II

BANCA EXAMINADORA


Msc. Wanderli Rogério Moreira Leite
(Orientador)


Prof. Dr. Paulo Belli Filho
(Membro da banca)


Prof. Dr. Carlos José de Carvalho Pinto
(Membro da banca)

FLORIANÓPOLIS
JANEIRO/2013

AGRADECIMENTOS

Ao professor Paulo, pelos ensinamentos e pela oportunidade cedida em participar do LABEFLU, onde adquiri conhecimentos que levarei para toda a vida!

À rede CASAN/FAPEU/FAPESC e ao engenheiro Alexandre Trevisan pelo apoio a essa pesquisa!

Ao professor Carlos, pela grande gentileza e disposição em ajudar e pelos ensinamentos valiosos!

Aos colegas Bruna e Eric, pela amizade, apoio e ajuda constante!

Ao meu orientador, Wanderli, pela compreensão, paciência e alegria em ensinar, pela amizade e confiança!

À minha família, meu porto seguro, pelo amor sem medida, por me ajudar a superar os momentos difíceis e me fazer chegar onde estou!

Aos demais professores, colegas e amigos que foram importantes nessa conquista!

Muito Obrigada!

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial agrícola do lodo de esgoto gerado na Estação de Tratamento de Esgotos Insular, localizada no município de Florianópolis – SC, após passar pelo processo de tratamento por digestão anaeróbia mesofílica. Realizou-se a determinação de características físico-químicas e microbiológicas no lodo afluente e efluente ao digestor anaeróbio piloto. Os teores de metais pesados ficaram abaixo dos limites estabelecidos pela legislação brasileira para fins de reúso agrícola, a Resolução CONAMA 375/2006. Os elementos que estiveram em maior quantidade foram o Zinco – 1045,3 mg/kg - e o Cobre – 518,5 mg/kg. A concentração de sólidos voláteis foi reduzida pelo processo, resultando em um lodo efluente estável. O lodo em estudo apresentou níveis de patógenos que permitem enquadrá-lo na classe B: ausência de *Salmonella*, média de 3.10^5 NMP/gST coliformes fecais e 4,3 ovos totais/gST no lodo efluente. Os resultados demonstraram que o lodo da ETE Insular submetido à digestão anaeróbia mesofílica pode ser utilizado de forma restrita na agricultura, sendo esta uma forma de valorização do sub-produto do tratamento de esgoto. Ressalta-se ainda o elevado valor nutricional de lodo de esgoto em geral.

PALAVRAS-CHAVE: lodo de ETE, digestão anaeróbia mesofílica, reúso agrícola, Resolução CONAMA 375/2006.

ABSTRACT

This research aimed to evaluate the agricultural potential of sewage sludge generated in the Wastewater Treatment Plant Insular, located in Florianópolis – SC, after treated by the process of mesophilic anaerobic digestion. Parameters physicochemical and microbiological were analyzed in influent and effluent samples from anaerobic digester. The levels of heavy metals were below from those established in Brazilian legislation for agricultural reuse, CONAMA 375/2006. Zinc and copper were present in larger amount - 1045,3 mg/kg e 518,5 mg/kg, respectively. The concentration of volatile solids was reduced by the process and resulted in a stable sludge. This sludge can be classified as class B: *Salmonella* was absent, fecal coliform achieved an average of 3.10^5 NMP/Gst and helminth eggs an average of 4,3 total eggs/gST. The results showed that the sewage sludge generated at WWTP Insular, submitted to mesophilic anaerobic digestion, can be used restrictively in agriculture, wich is a way to appreciate the waste of sewage treatment. The high nutritional value of sewage sludge in general is also benefic.

WORD-KEY: Sewage sludge, mesophilic anaerobic digestion, agricultural reuse, CONAMA 375/2006.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição do grupo Coliformes	12
Figura 2 – Ovo de <i>Ascaris Lumbricoides</i> (ou var. <i>suum</i>)	14
Figura 3 – Ovo de <i>Trichuris sp.</i>	15
Figura 4 – Ovo de <i>Taenia sp.</i>	15
Figura 5 - Esquema simplificado para digestão anaeróbia	19
Figura 6 - Etapas do gerenciamento de lodo	29
Figura 7- Representação esquemática do sistema de digestão anaeróbia de 30	
Figura 8 – Resumo das etapas da análise de ovos de helmintos	33
Figura 9 - Concentração de ovos de helmintos nas amostras do lodo afluente e efluente	40
Figura 10 - Larva de <i>ancilostomatídeo</i> em amostra de lodo (aumento de 40x)	42
Figura 11 – Fungos visualizados em uma amostra afluente (aumento de 400x)	43
Figura 12 – Ovos de helmintos por gramas de ST no lodo	43
Figura 13 - Proporção de espécies de helmintos nas amostras afluente e efluente	45
Figura 14 - Espécies de ovos de helmintos encontradas no lodo em (aumento de 400x)	45
Figura 15 – Ácaro e ovo de ácaro encontrados em uma amostra afluente (aumento de 100x)	47
Figura 16 – Partículas cristalinas visualizadas em microscópio (aumento de 100x)	48
Figura 17 – Relação SV/ST no lodo afluente e efluente	51
Figura 18 - Remoção de STV no processo de digestão anaeróbia	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tipos de sólidos gerados em diferentes unidades de uma ETE..	5
Quadro 2 – Porcentagem de redução de patógenos em unidades de tratamento de esgotos.....	10
Quadro 3 – Tempo de sobrevivência típico de patógenos à 20°C e 30°C em vários ambientes.....	10
Quadro 4 – Concentração de microrganismos em esgoto não tratado e sua respectiva dose infectiva	11
Quadro 5 - Tamanho, densidade e velocidade de sedimentação de algumas espécies de ovos de helmintos.....	14
Quadro 6 - Etapas e objetivos do gerenciamento do lodo.....	16
Quadro 7 - Temperaturas mínimas, ótimas e máximas para as bactérias, em °C	20
Quadro 8 - Classes de lodo ou produto derivado – agentes patogênicos.....	25
Quadro 9 - Lodos de esgoto ou produtos derivados – substâncias inorgânicas	26
Quadro 10 - Método analítico e frequência das análises	31
Quadro 11 – Metodologias utilizadas para a análise de metais pesados	35
Quadro 12 – Concentração de metais pesados no lodo	38
Quadro 13 - Coliformes totais e fecais no lodo.....	48
Quadro 14 – Redução (em log) de coliformes no processo de digestão anaeróbia.....	49
Quadro 15 – Concentração de salmonella spp. no lodo efluente.....	50
Quadro 16 – Resumo das características do biossólido.....	52

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVO.....	3
2.1	<i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</i>	<i>3</i>
3	JUSTIFICATIVA	4
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
4.1	<i>LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO.....</i>	<i>5</i>
4.1.1	Produção	6
4.1.2	Composição.....	7
4.1.2.1	Matéria orgânica e nutrientes	7
4.1.2.2	Metais Pesados.....	8
4.1.2.3	Poluentes orgânicos variados	9
4.1.2.4	Microrganismos patogênicos	9
4.2	<i>TRATAMENTO DE LODO DE ETE.....</i>	<i>15</i>
4.2.1	Etapas do tratamento.....	16
4.2.2	Digestão anaeróbia mesofílica de lodo de ETE	18
4.3	<i>VALORIZAÇÃO DE LODO DE ETE.....</i>	<i>20</i>
4.3.1	Reciclagem agrícola.....	21
4.3.2	Aspectos Legais	23
5	METODOLOGIA	28
5.1	<i>ORIGEM DO LODO.....</i>	<i>28</i>
5.2	<i>DIGESTOR ANAERÓBIO DE LODO PILOTO.....</i>	<i>29</i>
5.3	<i>COLETA DE AMOSTRAS.....</i>	<i>30</i>
5.4	<i>ANÁLISES LABORATORIAIS.....</i>	<i>31</i>
5.4.1	Identificação e quantificação de ovos de helmintos (Hel)	32
5.4.2	Quantificação de coliformes totais (CT) e fecais (CF).....	34
5.4.3	Quantificação de Salmonella spp. (Sal)	35
5.4.4	Quantificação de Metais pesados	35
5.4.5	Determinação de Sólidos totais (ST) e voláteis (SV).....	36
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38

6.1	<i>SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS</i>	38
6.1.1	Metais pesados	38
6.2	<i>INDICADORES BACTERIOLÓGICOS E AGENTES PATOGÊNICOS</i>	39
6.2.1	Ovos de helmintos	39
6.2.2	Coliformes totais e fecais	48
6.2.3	Salmonella spp.	50
6.3	<i>ESTABILIDADE</i>	50
6.3.1	Sólidos totais e voláteis	50
6.4	<i>AVALIAÇÃO DA PERSPECTIVA DE REÚSO</i>	52
7	CONCLUSÕES	55
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
9	APÊNDICES	63

1 INTRODUÇÃO

Embora o Brasil ainda apresente baixos índices de cobertura quanto aos serviços de saneamento básico, 53,5% - coleta e 37,8%, - tratamento de esgotos, segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento (BRASIL, 2010), há uma expectativa de expansão e, conseqüentemente, a mesma tendência de aumento da produção de lodo. O lodo de estação de tratamento de esgotos é um resíduo intrínseco do tratamento biológico de esgotos, com elevada carga de matéria orgânica.

Em uma estação de tratamento de esgotos (ETE) o objetivo principal é o tratamento do esgoto de forma que suas características permitam o seu lançamento no corpo receptor. Muitas vezes, porém, os subprodutos sólidos do tratamento da fase líquida (lodos, embalagens de substâncias químicas, etc) são negligenciados (TSUTIYA, 2002).

De acordo com Sobrinho (2002), geralmente a maior preocupação com o resíduo lodo restringe-se à sua estabilização e desaguamento, para atingir um teor de sólidos no lodo na faixa de 15% a 40%, visando quase que exclusivamente a sua retirada da estação de tratamento de esgoto por caminhões, porém, sem uma definição clara do seu destino final. Este raciocínio pode levar a sérios problemas ambientais e de saúde pública. O lodo não tratado corretamente pode contaminar o ambiente e reduzir a vida útil de aterros sanitários (alternativa de disposição final mais utilizada no Brasil para o lodo de ETE).

Além disso, lodos de esgoto apresentam características que incentivam a sua reutilização na agricultura, e o não aproveitamento desse potencial é contrário aos princípios do desenvolvimento sustentável. Na Agenda 21, reconhece-se a importância dessa questão, em que no capítulo 21 do documento é discutido o tema “Manejo ambientalmente saudável dos resíduos sólidos e questões relacionadas com esgotos”, em que define as seguintes orientações para sua gestão: redução da produção, aumento máximo da reutilização e a promoção de depósitos e tratamentos ambientalmente saudáveis (ONU, 1992).

A digestão anaeróbia e a reciclagem agrícola se configuram como alternativas de grande interesse econômico e ambiental. A primeira está compreendida na etapa de estabilização do lodo, podendo também funcionar como uma higienização. Já a aplicação no solo compreende a etapa de disposição final, sendo classificada como uma disposição produtiva ou benéfica. O lodo apresenta grande quantidade de nutrientes - nitrogênio, fósforo e potássio – os quais são essenciais para o desenvolvimento das plantas.

Aliando estas duas etapas, inúmeros são os benefícios, como a redução do volume de lodo a ser destinado; viabilidade de aproveitamento do biogás; valorização do resíduo pela produção de fertilizantes (menos agressivos ao meio ambiente). Vários autores consideram o biossólido um fertilizante promissor dada a importância da reciclagem de nutrientes embutida nesta prática (PEGORINI, 2002; TSUTIYA, 2002; ANDREOLI, 2006).

É preciso salientar, porém, a necessidade do atendimento dos requisitos mínimos, conforme a legislação vigente (Resolução CONAMA 375/2006, no Brasil), para a adequada reciclagem do lodo na agricultura.

2 OBJETIVO

Verificar o enquadramento de parâmetros microbiológicos e físico-químicos do lodo de ETE submetido à digestão anaeróbia mesofílica na Resolução CONAMA 375/2006, que regula o uso agrícola do lodo.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a qualidade do lodo residual no processo biológico quanto à presença de substâncias inorgânicas;
- Caracterizar o lodo quanto à redução do conteúdo orgânico e à sua atratividade de vetores;
- Verificar a presença e eficiência de remoção de organismos patogênicos no processo de digestão anaeróbia do lodo;
- Classificar o lodo residual quanto à Resolução CONAMA 375/2006 e avaliar o potencial de reutilização agrícola.

3 JUSTIFICATIVA

O lodo de ETE é um subproduto inevitável do tratamento biológico de esgotos. Este resíduo apresenta uma elevada carga poluidora, por apresentar matéria orgânica em excesso, organismos patogênicos, metais pesados e por ter características favoráveis à atração de vetores. Portanto, a inadequada destinação do lodo de ETE pode gerar problemas ambientais e de saúde pública.

Diante disso, é imprescindível que uma unidade de tratamento de esgotos apresente soluções para o gerenciamento adequado do lodo gerado no processo. A tendência atual prioriza combater o resíduo na fonte geradora, reutilizar o resíduo e, em últimos casos, o descartar corretamente. Minimizar a produção do lodo é uma medida difícil, mas que vem sendo estudada. Já a reutilização do lodo é uma medida bastante viável e que pode trazer inclusive economias para a unidade geradora.

A utilização da digestão anaeróbia mesofílica seguida da aplicação do lodo na agricultura está inserida neste contexto. Pretende-se com este trabalho, monitorar o processo de digestão anaeróbia mesofílica e analisar o lodo efluente com vistas a sua reutilização na agricultura, conforme requisitos da Resolução CONAMA 375/2006.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO

O termo lodo tem sido utilizado para designar os subprodutos sólidos do tratamento de esgotos (CASSINI, 2003). Segundo Spinosa e Vesilind (2001), a constituição do lodo é definida por uma suspensão de sólidos orgânicos e inorgânicos, com concentração usual de 1% a 5%, misturados em um líquido com infinita variedade de sólidos dissolvidos.

Em uma amostra de lodo, a maior parte dos sólidos é matéria orgânica e nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo. Distingue-se lodo primário (material sedimentável no esgoto bruto) gerado nos processos de tratamento primário e lodo secundário, aquele produzido nos sistemas de tratamento biológico (ANDREOLI, 2006).

Além do lodo, outros sólidos são gerados em diferentes operações do sistema de tratamento de esgotos, conforme mostrado no Quadro 1.

Quadro 1 – Tipos de sólidos gerados em diferentes unidades de uma ETE

Unidade operacional	Tipo de sólido
Gradeamento	Sólidos grosseiros
Desarenador	Sólidos inorgânicos (areia e silte) e espuma
Decantador primário	Lodo primário e espuma
Tratamento biológico	Sólidos suspensos
Decantador secundário	Lodo secundário e espuma

Fonte: Adaptado de Metcalf e Eddy (2003)

Grande parte dos sólidos em lodos secundários são bactérias vivas responsáveis por metabolizar substratos orgânicos. O lodo é útil nos processos biológicos de tratamento enquanto ele for biomassa ativa. Quando ele perde sua atividade, esta capacidade fica reduzida, tornando-se um resíduo. O momento e as condições em que o lodo deixa de ser biomassa para se transformar em resíduo dependem da tecnologia do sistema de tratamento e de sua operação (MALTA, 2001).

O lodo de esgoto (primário e secundário) é o único resíduo de ETE que tem propriedades para ser utilizado na agricultura, sendo esse uso vetado pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (2006) para os outros sólidos citados no Quadro 1.

4.1.1 Produção

De acordo com o Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (BRASIL, 2010), 53,5% da população urbana brasileira é atendida com rede de esgoto, sendo somente 37,8% destes, tratado. Florianópolis conta com 53,9% de esgoto coletado, sendo que este é 100% tratado. A região mais desfavorecida é a Norte, com um índice de apenas 10% de atendimento com rede de esgoto e 22,4% destes com tratamento.

Nota-se, então, que menos da metade da população brasileira é atendida com tratamento de esgoto e a distribuição nas regiões do país é desigual. Considerando que as consequências para a saúde e meio ambiente da falta de tratamento de esgotos são graves, este índice está aquém do mínimo necessário.

Através do Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) são previstos investimentos para o aumento ao acesso à coleta e tratamento de esgotos. Com este acréscimo previsto no número de Estações de Tratamento de Esgotos, cresce também a geração do resíduo do tratamento, o lodo de esgoto. A perspectiva de aumento da produção de lodo é consequência, portanto, da melhoria dos níveis de saneamento básico da população (PEGORINI, 2002).

Estima-se que a quantidade de lodo produzido representa entre 1% e 2% do volume do esgoto tratado (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001). Porém, o seu gerenciamento é bastante complexo e pode representar um custo de 25% a 65% do total gasto com a operação de uma estação de tratamento de esgoto (RIAU *et al.*, 2010).

O volume de lodo produzido em uma ETE varia de acordo com o tipo de tratamento da fase líquida (CASSINI, 2003). Segundo Murray *et al.* (2008) *apud* Hospido (2010), 30 kg de lodo seco por habitante são gerados anualmente em todo o mundo em estações de tratamento de esgoto.

Esta crescente produção de lodo tem levado ao desenvolvimento de novos processos de tratamento, de forma a atender às exigências ambientais, de segurança e saúde pública, que estão ficando cada vez mais restritivas (ANDREOLI, 2006).

4.1.2 Composição

O lodo de esgoto apresenta composição muito variável, pois esta está relacionada com o esgoto bruto e o tratamento da fase líquida utilizado (ANDREOLI, 2001). Muitos dos constituintes podem apresentar ao mesmo tempo características desejáveis e outras indesejáveis para determinado uso, ressaltando a necessidade de tratamento.

De acordo com Andreoli (2006), o lodo gerado em Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários pode apresentar três aspectos indesejáveis:

- instabilidade biológica (se a fração biodegradável no lodo for alta, este torna-se putrescível);
- qualidade higiênica ruim (o lodo apresenta uma grande variedade e quantidade de vírus, bactérias e parasitas, constituindo-se uma ameaça para a saúde pública);
- concentração de sólidos suspensos é baixa (está na faixa de 5g/L a 50g/L, de modo que o volume de lodo produzido é grande).

Além disso, pode-se citar a presença de metais pesados e compostos orgânicos poluentes.

Segundo Tsutiya (2002), os fatores de risco devido ao uso do lodo na agricultura podem ser divididos em: temporários (odor, salinização, poluição das águas e organismos patogênicos) e de longo prazo (metais pesados e componentes orgânicos).

Apresenta-se abaixo um resumo dos principais constituintes do lodo de esgoto e também dos principais contaminantes.

4.1.2.1 Matéria orgânica e nutrientes

O lodo de esgoto é um material rico em matéria orgânica (40 a 60%), nitrogênio e outros macro e micronutrientes, como por exemplo o fósforo, zinco, potássio, etc. (MELO; MARQUES, 2001). Esta é uma característica muito valiosa do ponto de vista do reaproveitamento agrônômico deste resíduo.

A matéria orgânica exerce importantes efeitos sobre as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, promovendo maior coesão entre as partículas, melhorando a capacidade de retenção de água, entre outros (ANDREOLI, 2006).

Os nutrientes são elementos químicos essenciais para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Os macronutrientes aparecem na composição do tecido vegetal em maior quantidade, ao passo que os micronutrientes aparecem em menor quantidade. Os elementos N, P, K, Ca, Mg e S são macronutrientes e os elementos Cu, Fe, Mn, Zn, Mo, B e Cl são micronutrientes (MELO; MARQUES, 2001).

Vários autores consideram o bio sólido proveniente de lodos de ETE um fertilizante promissor dada a importância da reciclagem de nutrientes inerente desta prática (ANDREOLI, 2006; TSUTIYA, 2002; PEGORINI 2002).

O fósforo e o nitrogênio presentes no lodo podem reduzir a necessidade de uso de fertilizantes químicos em 70% e 50%, respectivamente (BENGTSSON *et al.*, 1997 apud HOSPIDO *et al.*, 2010).

4.1.2.2 Metais Pesados

Na terminologia química, metais pesados são elementos químicos que possuem peso específico maior que 5g/cm^3 ou número atômico maior do que 20. Entretanto, este termo vem sendo utilizado para designar elementos químicos que contaminam o meio ambiente, podendo ser metais, semi-metais e até não metais, como o selênio (TSUTIYA, 2002).

O lodo de esgoto, estritamente urbano, isto é, resultante do tratamento de efluentes domésticos, possui uma concentração normalmente baixa de metais pesados. Porém, quando há contribuição de despejos industriais ou águas pluviais no sistema, a concentração de metais pesados pode aumentar significativamente (BERTON, 2000; METCALF; EDDY, 2003).

Quanto à utilização do bio sólido na agricultura, a maior preocupação é a possibilidade de acúmulo dos metais no solo, devido à aplicação sucessiva de material, com posterior absorção pelas plantas e contaminação da cadeia alimentar, podendo causar severos danos para a saúde humana (SILVA, 2000). Além disso, os metais pesados exercem efeitos negativos sobre o crescimento das plantas e afetam os processos bioquímicos que ocorrem no solo (TSUTIYA, 2002).

4.1.2.3 Poluentes orgânicos variados

De acordo com Hospido (2010), as pesquisas com poluentes orgânicos são recentes. Devido a isso, pouco se sabe sobre suas características e inter-relações com as águas residuárias, bem como seus efeitos no meio ambiente e na saúde humana.

Estas substâncias derivam principalmente da contribuição de despejos industriais e de águas residuárias de áreas agrícolas (JORDÃO; PESSOA, 1995). Segundo Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001) os principais grupos destes produtos encontrados no lodo são: solventes orgânicos, pesticidas e bifenilos policlorados (PCBs).

Grande parte destes compostos são biodegradados muito lentamente e persistem no meio ambiente por longo período de tempo, causando enormes riscos à saúde humana. Eles podem penetrar na cadeia alimentar, e, mesmo em quantidades pequenas, podem estar presentes em quantidades elevadas nos níveis tróficos mais altos devido a sua característica de bioacumulação (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

4.1.2.4 Microrganismos patogênicos

Os principais grupos de organismos de interesse, do ponto de vista de saúde pública, são: bactérias, vírus, protozoários e helmintos (GONÇALVES, 2003).

A origem dos agentes patogênicos no esgoto é predominantemente humana e reflete diretamente o nível de saúde da população e as condições de saneamento básico de cada região, sendo sua quantidade bastante variável (VON SPERLING, 2005). Portanto, o avanço na qualidade do serviço de coleta e tratamento de esgotos se apresenta ainda como um benefício à segurança do uso do lodo na agricultura (ANDREOLI, 2001). Outros fatores que influenciam na quantidade de patógenos são a região geográfica e a presença de indústrias agro-alimentares (VON SPERLING, 2005).

Do ponto de vista biológico, o lodo concentra a maioria dos organismos presentes no esgoto sanitário, pois os organismos existentes no esgoto se concentram no lodo durante o processo de sedimentação (ANDREOLI, 2001).

Existem várias alternativas de higienização do lodo e do efluente líquido que promovem a diminuição dos microrganismos, podendo elas ser por meios térmicos, químicos e/ou biológicos (ANDREOLI, 2001). O próprio tratamento convencional da fase líquida reduz certa quantidade de patógenos, conforme pode ser visualizado no Quadro 2.

Quadro 2 – Porcentagem de redução de patógenos em unidades de tratamento de esgotos

Unidade	Vírus entéricos (%)	Bactérias (%)	Cistos de protozoários (%)	Ovos de helmintos (%)
Decantação primária	0 - 30	50 - 90	10 – 50	30 - 90
Filtro biológico	90 - 95	90 - 95	50 – 90	50 - 95
Lodo ativado	90 - 99	90 - 99	50 – 80	50 - 99
Lagoas de estabilização*	99,99 - 100	99,99 - 100	100	100

*Três células, com tempo de detenção > 25 dias

Fonte: USEPA (1983) apud Andreoli (2001)

Em geral, organismos patogênicos não se reproduzem no meio ambiente, apenas no trato gastrointestinal dos hospedeiros. Porém, algumas bactérias podem fazê-lo em condições extremamente favoráveis, e raras exceções de helmintos, como *Strongyloides stercoralis* (GONÇALVES, 2003). O tempo de sobrevivência de alguns microrganismos no ambiente pode ser visualizado no Quadro 3.

Quadro 3 – Tempo de sobrevivência típico de patógenos à 20°C e 30°C em vários ambientes

Patógeno	Tempo de sobrevivência (dias)		
	Água e esgoto	Vegetais	Solo
Coliforme fecal	<60, usual <30	<30, usual <15	<120, usual <60
<i>Salmonella</i>	<60, usual <30	<30, usual <15	<120, usual <60
Ovos de <i>Ascaris lumbricoides</i>	muitos meses	<60, usual <30	<muitos meses

Fonte: Metcalf; Eddy (2003)

As bactérias são os organismos patogênicos mais sensíveis à ação de processos de desinfecção físicos e químicos e, portanto, são de inativação relativamente fácil em ETEs com tempo prolongado de exposição à ação dos raios solares ultravioletas ou com unidades de desinfecção. Os cistos de protozoários são moderadamente resistentes e os ovos de helmintos são extremamente resistentes à ação de desinfetantes. Por outro lado, os cistos e ovos apresentam tamanho e densidade que favorecem a remoção por processos físicos, como filtração e sedimentação (GONÇALVES, 2003).

As patologias causadas por esses organismos são variáveis, podendo se apresentar na forma de simples diarreia até gastroenterite severa, hepatites, meningites, infecções respiratórias, alterações neurológicas (neurocisticercose), dentre outras (TSUTIYA, 2002).

As formas de transmissão destes agentes etiológicos são: consumo de água contaminada, alimentos contaminados, transmissão entre pessoas (mecanismo mão-boca, fômites e alimentos) e contato com corpos receptores (recreação, pesca, atividades domésticas, etc.). No caso de ovos de helmintos, a contaminação pode ainda ocorrer pelo contato com solo contaminado. A transmissão por ingestão de água contaminada neste caso é menos incidente (GONÇALVES, 2003).

A dose infectiva, ou seja, a quantidade mínima de organismos responsável pelo surgimento de doenças varia de acordo com o organismo, como se observa no Quadro 4.

Quadro 4 – Concentração de microrganismos em esgoto não tratado e sua respectiva dose infectiva

Patógeno	Concentração (NMP/100mL)	Dose infectiva (nº de organismos)
Coliforme fecal	10^6 a 10^8	10^8 a 10^{10}
<i>Salmonella</i>	10^2 a 10^4	10^1 a 10^8
Ovos de helmintos	10^1 a 10^3	-
Ovos de <i>Ascaris Lumbricoides</i>	10^{-2} a 10^0	1 a 10

Fonte: Metcalf; Eddy (2003)

Abaixo segue uma descrição mais detalhada dos microrganismos analisados nesse estudo, e aos quais a legislação brasileira se refere para uso agrícola do lodo: ovos de helmintos, *Salmonella* e coliformes fecais.

Coliformes fecais

Coliforme é um grupo de bactérias entéricas, ou seja, sempre presente no trato digestivo de animais de sangue quente, inclusive humanos, sendo encontradas em suas fezes, no solo e plantas (NEW YORK, 2012; USEPA, s. d.).

Coliformes são utilizados como indicadores de contaminação fecal e possível presença de bactérias patogênicas (USEPA, 2003). A quantidade de bactérias patogênicas é relativamente baixa em esgotos, e a variedade de patógenos, alta. Desta forma, não é prático realizar a análise de todos os possíveis patógenos. Nesse sentido a presença de bactérias patogênicas é determinada de uma forma indireta, através de organismos indicadores, como as bactérias do grupo coliforme (NEW YORK, 2012).

Os coliformes apresentam-se em grande quantidades nas fezes humanas: cada indivíduo elimina em média 10^9 a 10^{12} células por dia. De 1/3 a 1/5 do peso das fezes humanas é constituído por bactérias do grupo coliformes (VON SPERLING, 2005).

O grupo coliformes é dividido em três subgrupos: coliformes totais, coliformes fecais (ou coliformes termotolerantes) e *Escherichia coli*; sendo que cada um compõe um diferente risco de contaminação (WASHINGTON, 2012). A Figura 1 exhibe a composição do grupo coliformes.

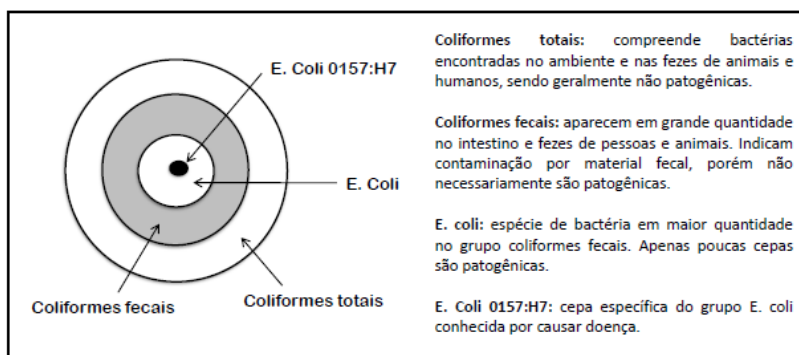


Figura 1 – Composição do grupo Coliformes

Fonte: adaptado de New York (2012) e Washington (2012)

O grupo coliformes fecais, conforme mencionado, apresenta a bactéria *Escherichia coli* como principal representante. Outras bactérias que estão presentes, em menor quantidade, no grupo coliformes fecais são: *Citrobacter spp.*, *Enterobacter spp.* e *Klebsiella spp.* (BONJOCH, 2009).

A análise de coliformes totais é realizada para verificar a eficiência de um processo na remoção desses organismos. Já as análises de coliformes fecais como as de *E. coli* são utilizadas para indicar a presença de contaminação fecal no material.

Salmonella spp.

Assim como os coliformes fecais, *Salmonella* é um gênero de bactéria entérica, sendo um bom indicador da redução de outras bactérias patogênicas, pois está tipicamente presente em maior densidade que outras bactérias e é pelo menos igualmente resistente (USEPA, 2003).

Usualmente, as infecções intestinais primárias causadas pela bactéria são chamadas de salmoneloses, enquanto que as mais disseminadas chamam-se febres entéricas. Os sorotipos mais virulentos são a *S. typhi* e a *S. paratyphi*, causadoras das febres tifoide e paratifoide, estreitamente associadas a condições precárias de saneamento básico (BASTOS; BEVILACQUA; KELLER, 2003).

Ovos de Helmintos

Dentre os agentes patogênicos, os helmintos são os que apresentam maior capacidade de resistência às condições do meio, (ANDREOLI, 2001).

Os helmintos despertam também grande interesse, pois o ambiente encontrado nos processos de tratamento de esgotos é propício ao embrionamento de seus ovos (HAYS, 1977). Alguns estudos tem mostrado que filtros percoladores, filtros de areia e lodos ativados promovem o embrionamento dos ovos como o de *Ascaris*, *Necator* e *Ancylostoma* (WHO, 2004).

Ainda de acordo com a World Health Organization (2004), os fatores preocupantes em relação aos ovos de helmintos são principalmente: elevada persistência no solo, dose infectiva baixa e pequena ou nenhuma imunidade do hospedeiro. Em estudos realizados por Smith (1997) e Kowa (1985) apud USEPA (2003), os autores observaram que os ovos de helmintos podem sobreviver por vários anos no solo.

Em geral, o contato com novos hospedeiros humanos ocorre de forma passiva pela ingestão de ovos ou larvas, ou ativamente, quando a larva infectante penetra na pele ou mucosa (GONÇALVES, 2003). Em um estudo recente, Oliveira Filho *et al.* (2011) estimou que 1 bilhão de indivíduos em todo o mundo estavam contaminados com *Ascaris lumbricoides*, sendo pouco menor o contingente infectado por *Trichuris trichiura* e pelos Ancilostomídeos.

As características do ovo variam de acordo com a espécie, conforme pode ser observado no Quadro 5.

Quadro 5 - Tamanho, densidade e velocidade de sedimentação de algumas espécies de ovos de helmintos

Espécie	Tamanho (um)	Densidade (g/cm ³)	Velocidade de sedimentação (m/h)
<i>Ascaris suum</i>	65x45	1,13	0,95
<i>Ascaris lumbricoides</i>	55x40	1,11	0,43
<i>Schistosoma mansoni</i>	50x150	1,18	5,23
<i>Trichuris trichiura</i>	22x50	1,15	0,48
<i>Taenia saginata</i>	40x35	1,3	0,83
Ancilostomídeos	60x40	1,06	0,26

Fonte: Dunn (1991) apud WHO (2004)

Seguem abaixo imagens de diferentes espécies de ovos de helmintos (Figura 2, Figura 3 e Figura 4).

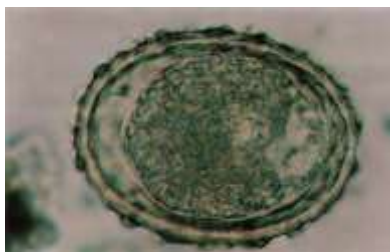


Figura 2 – Ovo de *Ascaris Lumbricoides* (ou var. *suum*)

Fonte: USEPA (2003)



Figura 3 – Ovo de *Trichuris* sp.

Fonte: USEPA (2003)

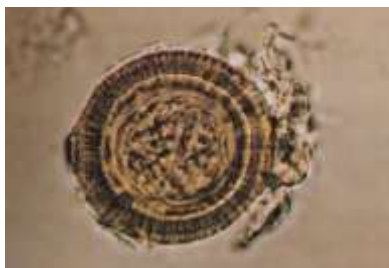


Figura 4 – Ovo de *Taenia* sp.

Fonte: USEPA (2003)

4.2 TRATAMENTO DE LODO DE ETE

A quantidade e as características dos lodos produzidos são definidas pela qualidade dos esgotos e pela alternativa de tratamento de esgotos adotada. Portanto, os mecanismos de gestão desses resíduos devem ser previstos já no período de concepção do sistema de tratamento de esgotos, considerando, além das características do esgoto, as condições da região onde será instalada a ETE, como o potencial agrícola, existência de aterro sanitário próximo, características de ocupação do solo, entre outros (ANDREOLI, 2001).

Os processos de tratamento de lodo visam reduzir o teor de material orgânico biodegradável, a concentração de organismos patogênicos e o teor de água para que se obtenha um material sólido e estável, que não forneça perigo para a saúde e possa ser manipulado e transportado com facilidade e baixo custo (ANDREOLI, 2006).

Muitas vezes, em projetos de ETEs, a forma de destino final de lodos é negligenciada, fazendo com que este seja gerenciado em situações emergenciais, com altos custos financeiros e ambientais. Neste sentido, alguns órgãos ambientais estão exigindo o detalhamento de disposição final deste resíduo no procedimento de licenciamento de ETEs (ANDREOLI, 2001).

No que se refere à eliminação de contaminantes no processo de tratamento do lodo, os microrganismos patogênicos podem ser eliminados a níveis aceitáveis e os poluentes orgânicos e metais pesados dificilmente são através dos métodos de tratamento tradicionais. Neste caso, a prevenção é a melhor alternativa, principalmente o controle do lançamento de efluentes industriais na rede de esgotamento sanitário (ANDREOLI, 2001).

4.2.1 Etapas do tratamento

As principais etapas do gerenciamento do lodo são: adensamento ou espessamento, estabilização, condicionamento, desidratação ou desaguamento, higienização ou desinfecção e disposição final. O principal objetivo de cada uma dessas etapas é apresentado no Quadro 6.

Quadro 6 - Etapas e objetivos do gerenciamento do lodo

Etapas	Objetivo
Adensamento	Remoção da umidade (redução de volume)
Estabilização	Remoção da matéria orgânica (redução de sólidos voláteis)
Condicionamento	Preparação para a desidratação (principalmente mecânica)
Desaguamento	Remoção da umidade (redução de volume)
Higienização	Remoção de organismos patogênicos
Disposição Final	Destinação final dos subprodutos

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2005)

A escolha das etapas do tratamento do lodo depende das características do esgoto bruto, do tratamento de esgoto aplicado e da destinação visada para esse lodo (ANDREOLI, 2001).

Adensamento ou espessamento

Corresponde à etapa inicial de concentração de sólidos no lodo, por meio da remoção de parte da fração líquida. É um processo físico, geralmente por meio da ação da gravidade. A redução de volume obtida é benéfica para os processos subsequentes, pois reduz o volume requerido para tanques para digestão e a quantidade de produtos químicos para o condicionamento (METCALF; EDDY, 2003).

Estabilização

Segundo Metcalf e Eddy (2003), *“a estabilização do lodo tem como objetivos: reduzir a quantidade de patógenos, eliminar os maus odores e inibir, reduzir ou eliminar o potencial de putrefação.”* A estabilização pode ser biológica, química ou térmica (CASSINI, 2003). A digestão anaeróbia é compreendida como um processo de estabilização biológica (ANDREOLI, 2001).

Condicionamento

Objetiva proporcionar melhores condições para o funcionamento da etapa seguinte, o desaguamento. De acordo com Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001), *“o condicionamento visa a modificar o tamanho e a distribuição das partículas, as cargas de superfície e a interação das partículas no lodo.”* Isto é conseguido por meio da utilização de produtos químicos orgânicos ou inorgânicos, ou de tratamento térmico.

Desidratação ou desaguamento

De acordo com Metcalf e Eddy (2003), *“desidratação é uma operação física unitária que reduz a umidade do lodo”*. Ainda segundo o autor, a seleção do dispositivo de desidratação do lodo é função das características do lodo e do espaço disponível.

Em ETEs de pequeno porte costuma-se usar a desidratação natural, por meio de processos de evaporação e percolação (leito de secagem, por exemplo), e já em ETEs de médio e grande porte é comum usar a desidratação mecânica (centrífuga, filtro prensa, prensa desaguadora) (ANDREOLI, 2001).

Higienização ou desinfecção

Esta etapa visa a remoção de microrganismos patogênicos do lodo. De acordo com Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001), os processos de estabilização, como a digestão anaeróbia e aeróbia, podem reduzir substancialmente os níveis de patogenicidade do lodo. Porém, muitos parasitas intestinais e seus ovos são muito pouco afetados por processos de digestão convencional, necessitando de uma etapa complementar para sua completa inativação, a higienização. O processo de higienização é introduzido ao gerenciamento do lodo quando a disposição final será no solo.

Disposição final

As alternativas mais usuais, em países desenvolvidos, para a disposição final de lodo tem sido aterro sanitário, incineração e reciclagem agrícola, as quais respondem por cerca de 90% do lodo produzido no mundo (ANDREOLI, 2001). O mesmo autor afirma que a alternativa com maior perspectiva de crescimento é a reciclagem agrícola, devido à necessidade de produção de alimentos em quantidades cada vez maiores. Além disso, a quantidade de lodos lançados em aterro sanitário tende a diminuir devido às exigências ambientais crescentes para utilização desta alternativa.

4.2.2 Digestão anaeróbia mesofílica de lodo de ETE

“A digestão anaeróbia se apresenta como um processo de decomposição da matéria orgânica e inorgânica na ausência de oxigênio molecular” (METCALF; EDDY, 2003). Este processo leva a formação de subprodutos entre os quais o gás metano e o dióxido de carbono que apresentam elevado potencial energético (ANDREOLI, 2006).

A digestão anaeróbia está compreendida entre os processos de estabilização de lodo, sendo o mais antigo e o mais comum em Estações de Tratamento de Esgotos de médio e grande porte devido ao seu baixo custo operacional (ANDREOLI, 2006).

Segundo Miki (2002) e Cassini (2003), o processo de digestão anaeróbia apresenta as seguintes vantagens:

- Redução substancial dos sólidos voláteis;
- Redução significativa do número de organismos patogênicos (com termofilia);
- Estabilização das substâncias instáveis orgânicas, presentes no lodo, eliminando, desta forma, os maus odores;

- Redução do volume do lodo através dos fenômenos de liquefação, gaseificação e adensamento.

Segundo Metcalf e Eddy (2003), *“devido à ênfase na conservação e reaproveitamento da energia e às vantagens de se obter um bio sólido que pode ser usado de forma benéfica, a digestão anaeróbia continua sendo o processo dominante de estabilização de lodo.”* Para Chernicharo (2007), as principais vantagens operacionais da digestão anaeróbia estão na robustez e alta eficiência.

Cassini (2003) acrescenta que, dentre as alternativas de estabilização, a digestão anaeróbia apresenta menor custo de implantação e operação, geração de biogás (pode ser usado como fonte de energia) e maior facilidade operacional.

A digestão anaeróbia envolve uma série de fases encadeadas envolvendo vários organismos do tipo facultativo ou anaeróbio, que simultaneamente quebram e assimilam a matéria orgânica. As fases podem ser divididas como segue: fase de hidrólise, fase ácida e fase metanogênica (MIKI, 2002; CASSINI, 2003). Estas etapas, bem como os microrganismos responsáveis por cada uma, estão representados na Figura 5.

Alguns autores consideram ainda uma quarta fase, a de acetogênese, que é a conversão de ácidos orgânicos, da acidogênese, em acetato. Quando existe a presença de sulfato no substrato, é observada também a sulfetogênese.



Figura 5 - Esquema simplificado para digestão anaeróbia

Fonte: Qasim (1999) apud Miki (2002)

A digestão anaeróbia de lodo processa-se em tanques reatores em geral de concreto, que dependem de um investimento inicial muito alto para serem construídos. Esses tanques podem ser configurados em um único estágio, ou em dois estágios, que é o caso mais usual. Nos sistemas de dois estágios, o processo ocorre em um digestor primário, que é responsável pela digestão anaeróbia, seguido de um digestor secundário, que opera como adensador do lodo digerido e nele se dá a separação da parte líquida (ANDREOLI, 2006).

Em relação a condições operacionais, a digestão anaeróbia pode ser mesofílica ou termofílica, em função da temperatura ótima operacional Quadro 7.

Quadro 7 - Temperaturas mínimas, ótimas e máximas para as bactérias, em °C

Bactérias	Temperatura mínima	Temperatura ótima	Temperatura máxima
Mesófilas	15 a 25	25 a 40	43
Termófilas	25 a 45	50 a 55	85

Fonte: Institute for solid wastes of American Public Works Association (1970) apud Andreoli (2001)

A digestão anaeróbia mesofílica tende a ser mais robusta e tolerante que o processo termofílico, além de apresentar melhor qualidade do sobrenadante. Além disso, o custo é menor pois o processo termofílico demanda maior consumo de energia (RIAU, 2010).

Por outro lado, digestão anaeróbia termofílica possui a vantagem de produzir maior quantidade de gás, requerer tanques menores e maior eficiência de remoção de patógenos (BONJOCH; BLANCH, 2009). Porém, o processo termofílico apresenta como desvantagens a pior qualidade do sobrenadante que apresenta grande quantidade de sólidos dissolvidos, odor e menor estabilidade operacional (METCALF; EDDY, 2003).

A norma americana EPA 40 CFR Part 503 da U.S. EPA, classifica a digestão anaeróbia como um processo de redução significativa de organismos patogênicos, condição obrigatória para produção de biossólidos classe B (USEPA, 2003). O Apêndice 3 apresenta um resumo de resultados de pesquisas já realizadas para avaliar a remoção de microrganismos no lodo através da digestão anaeróbia.

4.3 VALORIZAÇÃO DE LODO DE ETE

Embora o principal método de disposição final de lodo no Brasil seja o aterro sanitário, esta prática pode resultar em diminuição da vida útil dos aterros, demandando mais espaço para a disposição dos resíduos sólidos.

Há uma tendência mundial no sentido de proibir a disposição de lodo em aterros sanitários. Na Europa, a diretriz 91/271/ECC proibiu, a partir do ano de 2002, o uso de aterros sanitários como destino final para resíduos com possibilidade de reciclagem. Já nos EUA, a disposição de lodos em aterros sanitários vem sendo reduzida gradativamente (VIEIRA *et al.*, 2011). Há uma expectativa de que essa tendência mundial seja seguida também pelo Brasil (TSUTYA, 2002).

O lodo de esgoto não deve ser considerado como um simples resíduo, mas sim como um insumo em potencial. Suas características físico-químicas o tornam um excelente condicionador do solo, podendo auxiliar na melhoria das práticas agrícolas atualmente em uso (ANDREOLI, 1999).

O biossólido pode ser aplicado em solo agrícola, florestas, áreas degradadas, entre outros (METCALF; EDDY, 2003). Jordão e Pessoa (1995) destacam ainda a possibilidade de produção de composto organomineral. Os autores citam que nos Estados Unidos a prática da venda de fertilizantes advindos de lodos de esgoto sanitário é real e atrativa econômico e ambientalmente. Há ainda, segundo os autores, a alternativa de reúso industrial de lodo de esgoto para produção de agregado leve para a construção civil e incorporação do lodo à fabricação de concreto e de produtos cerâmicos.

4.3.1 Reciclagem agrícola

O lodo de esgoto possui características que favorecem sua aplicação como condicionador de solo e na agricultura. Destaca-se a grande quantidade de matéria orgânica e nutrientes presentes no lodo (MELO; MARQUES, 2001).

O termo biossólido é utilizado para designar o lodo produzido pelos sistemas de tratamento biológico de esgotos que passou por tratamento e alcançou os padrões federais e estaduais para o uso benéfico (USEPA, 2003). Complementando, Andreoli (2001) esclarece que o termo biossólido é reservado para um produto estabilizado, caso contrário, são empregados os termos torta, lodo ou sólidos. De acordo com Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001), uso benéfico é a prática de disposição do lodo no solo que objetiva “beneficiar-se das propriedades do lodo como fertilizante e condicionador do solo”.

A aplicação de bioossólidos no solo é benéfica porque a matéria orgânica melhora a estrutura do solo, a infiltração e a capacidade de retenção de água e a aeração do solo. Além disso, a matéria orgânica também contribui na capacidade de troca iônica do solo, o que beneficia a retenção de potássio, cálcio e magnésio (METCALF; EDDY, 2003).

Os macro e micronutrientes e micronutrientes ajudam no crescimento das plantas. Os nutrientes do bioossólido substituem parcialmente os caros fertilizantes químicos (METCALF; EDDY, 2003). Isto resulta em economia de recursos naturais e diminuição de custos. Diferentemente dos bioossólidos, os fertilizantes minerais não possuem matéria orgânica em sua composição, não proporcionando a melhoria na estrutura do solo.

Foster e Engelbrecht (1974) apud Hays (1977) salientam ainda que o solo é um excelente filtro para bactérias, vírus, ovos e cistos, desta forma a contaminação de água subterrânea é improvável se forem respeitados os requisitos de aplicação e se a profundidade do lençol freático for tal que permita essa aplicação.

Ainda que em número insuficiente, várias pesquisas realizadas no Brasil evidenciam que o lodo é um resíduo com potencial de uso agrícola (BETTIOL; CAMARGO, 2006). Para Tsutiya (2002), a experiência mundial tem mostrado que, quando os bioossólidos são aplicados na agricultura, obedecendo-se às diretrizes fixadas para seu uso, não foi constatado efeito adverso à saúde ou ao ambiente.

As limitações da aplicação do lodo de ETE no solo referem-se à presença de poluentes, como metais pesados, patógenos e compostos orgânicos persistentes, que podem causar impactos negativos, tais como: entrar na cadeia alimentar, acumular-se no solo, águas superficiais e subterrâneas, sedimentos e ar. O nitrato também representa um problema devido à falta de sincronismo entre sua mineralização e a absorção pelas plantas, resultando em risco de contaminação das águas subterrâneas (PIRES, 2006; ZEITOUNI, 2005).

A alternativa de reciclagem agrícola de lodo associa baixo custo e impacto ambiental positivo, quando é realizada dentro de critérios seguros (PEGORINI, 2002). De acordo com Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001), para garantir a segurança, a reciclagem do lodo só é recomendada quando existe um controle eficiente sobre a sua estabilidade, seu conteúdo de contaminantes biológicos e químicos.

Esta alternativa de disposição do lodo exige rígidos controles tanto em relação ao lodo gerado, quanto às taxas de agregação ao solo e aos componentes químicos e biológicos (JORDÃO;PESSOA, 1995). Apenas são aceitáveis para a reciclagem agrícola os lodos que não impliquem em riscos sanitários e ambientais para o solo, produtos agrícolas, saúde humana e o meio ambiente em geral (ANDREOLI, 2001).

A aplicação do lodo na agricultura pressupõe também a existência de um mercado em potencial, custos de transporte adequados, e um serviço de informação e divulgação sobre o uso do lodo e o controle de sua aplicação (JORDÃO; PESSOA, 1995).

Deve-se escolher áreas e culturas aptas, com a orientação técnica adequada e realizar o monitoramento ambiental (ANDREOLI, 2006). Representa uma alternativa particularmente interessante às regiões com agricultura intensiva ou solos degradados e com baixo nível de matéria orgânica. Além disso, a rápida oxidação da matéria orgânica dos solos tropicais é uma grande vantagem para o uso de biossólidos como condicionadores de solo (ANDREOLI, 2001).

É importante destacar que independente da opção preconizada, qualquer forma de disposição do lodo apresenta riscos e impactos ambientais potenciais (PEGORINI, 2002). Embora os cuidados em relação ao risco de contaminação pelo uso de lodo devam ser sempre observados, estudos epidemiológicos demonstram baixa correlação entre sua utilização e a incidência de doenças (ANDREOLI, 2001).

4.3.2 Aspectos Legais

Em vista à necessidade de controle e monitoramento do uso deste resíduo no solo, a maioria dos países possuem normas que regulamentam este uso, garantindo uma destinação segura.

Nos Estados Unidos, o órgão responsável pelo controle de impactos ambientais, a United States Environmental Protection Agency (USEPA), é responsável pela regulamentação da reciclagem agrícola de lodo. A norma norte americana EPA 40 CFR Part 503 da U.S. EPA, que foi publicada em 1992, é referência mundial nesse aspecto. Esta legislação federal encoraja o uso racional do resíduo, dispensando-o da jurisdição e regulamentação referente a resíduos perigosos, mas assegurando-se da proteção à saúde humana e ao meio ambiente de qualquer efeito adverso previsto (PIRES, 2006). Nesta norma, lodo é classificado de acordo com a concentração de microrganismos patogênicos, sólidos voláteis, metais pesados e poluentes orgânicos.

Na Europa está em vigor a Diretiva 86/278/EEC, a qual não estabelece limites de patógenos no lodo, e nem a atratividade de vetores, mas somente para metais pesados. (EUROPA, 1986) De acordo com Bastos (2012), a diversidade de lodo gerado dificultava a rotina de coleta e análises e assim somente os metais foram considerados. Outra forma adotada para proteger a saúde humana foi restringir o uso do lodo de acordo com a origem, tratamento do lodo e tipo de cultivo. Esta norma está em processo de revisão (UN-HABITAT, 2008).

No Brasil, a legislação que trata do assunto entrou em vigor em 2006, é a Resolução CONAMA 375. Esta resolução foi baseada na norma norte americana EPA 40 CFR Part 503. Ressalta-se que a constante revisão das normas e continuação dos estudos envolvendo o tema são muito importantes para garantir que uma atividade considerada ambientalmente desejável não se torne prejudicial ao próprio meio ambiente, e, conseqüentemente, a nós mesmos (PIRES, 2006).

Resolução CONAMA 357

Esta norma “estabelece critérios e procedimentos para o uso, em áreas agrícolas, de lodo gerado em estação de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, visando benefícios à agricultura e evitando riscos à saúde pública e ao meio ambiente” (CONAMA, 2006).

Um dos principais objetivos desta norma é garantir a segurança ambiental e sanitária do destino dos bio-sólidos, por meio da realização de um programa de monitoramento de sua qualidade. Este programa deve estabelecer quais contaminantes serão pesquisados, quais níveis serão tolerados, com que frequência o bio-sólido será analisado e quais alternativas de disposição são permitidas em função da qualidade obtida. Para o uso útil na agricultura, além de oferecer um produto de boa qualidade, a resolução estabelece os critérios de utilização agrônômica visando à adequação ambiental das áreas de aplicação, das culturas que serão exploradas e que permitam uma boa rentabilidade aos produtores rurais, garantindo a sustentabilidade da alternativa através do tempo.

De acordo com esta resolução, a caracterização do lodo de esgoto ou produto derivado a ser aplicado deve incluir os seguintes aspectos:

- I - potencial agrônômico;
- II - substâncias inorgânicas e orgânicas potencialmente tóxicas;
- III - indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos;
- IV - estabilidade.

Neste trabalho, serão abordadas questões relativas aos indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos, substâncias inorgânicas potencialmente tóxicas e à estabilidade.

- **Indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos:**

No que se refere ao aspecto de contaminação microbiológica, o lodo pode ser classificado em classe A ou B, dependendo da quantidade de microrganismos presentes. Esta classificação serve para selecionar os usos do biossólido.

Nem todas as culturas podem receber biossólidos provenientes de lodo de esgoto. É proibido, pela Resolução CONAMA 375/2006, a sua utilização em pastagens, cultivo de olerícolas, tubérculos e raízes, culturas inundadas, ou qualquer outra em que a parte comestível entre em contato com o solo. Os lodos enquadrados na classe A poderão ser utilizados para quaisquer culturas, exceto às restrições acima, e obedecendo restrições locais mencionadas na mesma legislação. Já a utilização de lodo de esgoto enquadrado na classe B é restrita ao cultivo de café, silvicultura, culturas para produção de fibras e óleos, com a aplicação mecanizada, em sulcos ou covas, seguida de incorporação.

A resolução CONAMA 375/2006, baseando-se na norma norte americana EPA 40 CFR Part 503, recomenda os seguintes processos para obtenção de biossólidos classe A e B:

- para biossólido Classe B (redução significativa de patógenos): digestão aeróbia, secagem, digestão anaeróbia, compostagem e estabilização com cal.
- para biossólido Classe A (redução adicional de patógenos): compostagem, secagem térmica, tratamento térmico, digestão aeróbia termofílica, irradiação e pasteurização;

Acrescenta-se que outros processos poderão ser propostos, desde que haja comprovação de sua eficiência e seja aceito pelo órgão ambiental.

Os limites estabelecidos para cada um destes organismos, para classe A e classe B de lodo, encontram-se na Quadro 8.

Quadro 8 - Classes de lodo ou produto derivado – agentes patogênicos

Tipo de lodo de esgoto ou produto derivado	Concentração de patógenos
A	Coliformes termotolerantes < 10^3 NMP/g de ST Ovos viáveis de helmintos < 0,25 ovo/g de ST <i>Salmonella</i> ausência em 10g de ST Vírus < 0,25 UFP ou UFF/g de ST
B	Coliformes termotolerantes < 10^6 NMP/g de ST Ovos viáveis de helmintos < 10 NMP/g de ST

Fonte: CONAMA (2006).

Em que:

ST: Sólidos Totais;

NMP: Número Mais Provável;

UFF: Unidade Formadora de Foco;

UFP: Unidade Formadora de Placa.

Além dos processos de redução de patógenos, os processos de redução de atratividade de vetores, os quais a norma também cita, deverão, da mesma forma, ser atendidos. A atratividade de vetores é definida como a característica do lodo de esgoto ou produto derivado, não tratado ou tratado inadequadamente, de atrair roedores, insetos ou outros vetores de agentes patogênicos.

O artigo n. 11 da referida Resolução estabelece que “decorridos 5 anos a partir da data de publicação desta Resolução (2011) , somente será permitida a aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado classe A, exceto que sejam propostos novos critérios ou limites baseados em estudos de avaliação de risco e dados epidemiológicos nacionais, que demonstrem a segurança do uso do lodo de esgoto Classe B.”

- **Estabilidade:**

No artigo 7 da referida Resolução, parágrafo 6º, está estabelecido que: *“para fins de utilização agrícola, o lodo de esgoto ou produto derivado será considerado estável se a relação entre sólidos voláteis e sólidos totais do bio sólido for inferior a 0,70.”*

- **Substâncias inorgânicas potencialmente tóxicas:**

Para a caracterização química do lodo de esgoto quanto à presença de poluentes inorgânicos, deverão ser determinadas as substâncias listadas no Quadro 9.

Quadro 9 - Lodos de esgoto ou produtos derivados – substâncias inorgânicas

Substâncias Inorgânicas	Concentração máxima permitida no lodo de esgoto ou produto derivado (mg/kg, base seca)
Arsênio	41
Bário	1300
Cádmio	39
Chumbo	300
Cobre	1500
Cromo	1000
Mercurio	17

Substâncias Inorgânicas	Concentração máxima permitida no lodo de esgoto ou produto derivado (mg/kg, base seca)
Molibdênio	50
Níquel	420
Selênio	100
Zinco	2800

Fonte: CONAMA (2006).

5 METODOLOGIA

5.1 ORIGEM DO LODO

O lodo estudado é proveniente da Estação de Tratamento de Esgotos Insular, que se localiza no município de Florianópolis/SC, sendo gerenciada pela Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN). Esta ETE atende uma população de aproximadamente 115000 habitantes, compreendendo 14 bairros do município. A vazão de esgoto afluente é cerca de 290L/s e volume de lodo descartado diariamente, aproximadamente 40 m³ (FLORIANÓPOLIS, 2011).

O tratamento biológico do efluente (fase líquida) desta estação de tratamento é por meio de lodos ativados com aeração prolongada, passando por desinfecção por cloro antes de ser lançado no corpo receptor, a Baía Sul. Ou seja, o nível terciário de tratamento é alcançado.

Os sólidos do gradeamento e caixa de areia são encaminhados para aterro sanitário. Já o lodo secundário excedente gerado no processo (fase sólida), passa pela etapa de desaguamento em adensadores e desidratação em centrífugas, antes de ser encaminhado para aterro sanitário.

Este trabalho visou complementar uma pesquisa realizada por Leite (2011) com um digestor anaeróbio de lodo piloto, o qual é inserido no processo depois da etapa de adensamento. Como pode ser observado na Figura 6, o fluxo mostrado pela seta inferior é a sequência adotada atualmente para o gerenciamento de lodo na ETE Insular. Já a seta tracejada, indica a alteração proposta, da qual este trabalho trata.

A fim de verificar variáveis de entrada e saída deste sistema piloto, as amostras coletadas foram: antes do digestor anaeróbio, ou seja, depois do adensador de lodo, e depois de passar pelo digestor anaeróbio. Convencionou-se denominar a amostra que vem do adensador de afluente ou adensada e a que sai do digestor de efluente ou digerida.

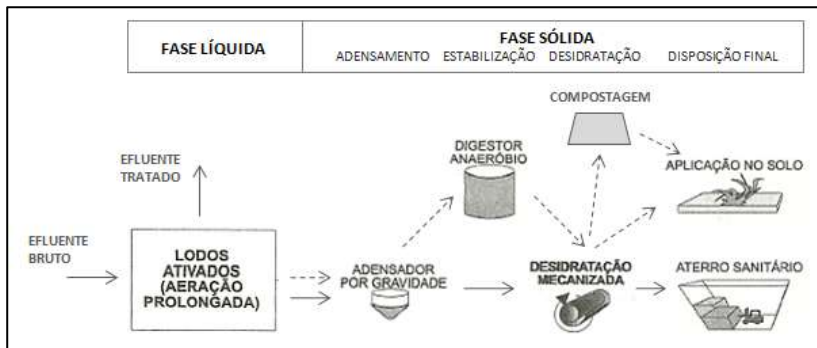


Figura 6 - Etapas do gerenciamento de lodo

5.2 DIGESTOR ANAERÓBIO DE LODO PILOTO

O digestor anaeróbico em escala piloto está instalado nas dependências da ETE Insular. O digestor é de aço inoxidável e possui um volume útil de 100L. Existe um sistema de aquecimento através de uma resistência elétrica tipo baioneta e um sistema de homogeneização mecânica composto por um agitador de três hélices acionado por motor-reductor.

O lodo adensado era captado das tubulações de lodo da ETE e recalcado para um reservatório superior. A partir disso a alimentação de lodo ocorria por gravidade, sendo controlada por um painel de comandos. No momento da alimentação do digestor, simultaneamente à entrada de lodo adensado, ocorria a saída de lodo digerido por pressão hidrostática.

O sistema operou em agitação contínua, exceto no momento de coleta de amostra, quando o sistema de agitação era desligado por três horas para permitir a separação de fases. As amostras coletadas correspondem à operação em temperatura mesofílica, 35°C, e a um tempo de detenção hidráulica (TDH) de 7 dias e vazão afluyente de 14 L/dia.

A representação esquemática deste sistema pode ser observada na Figura 7.

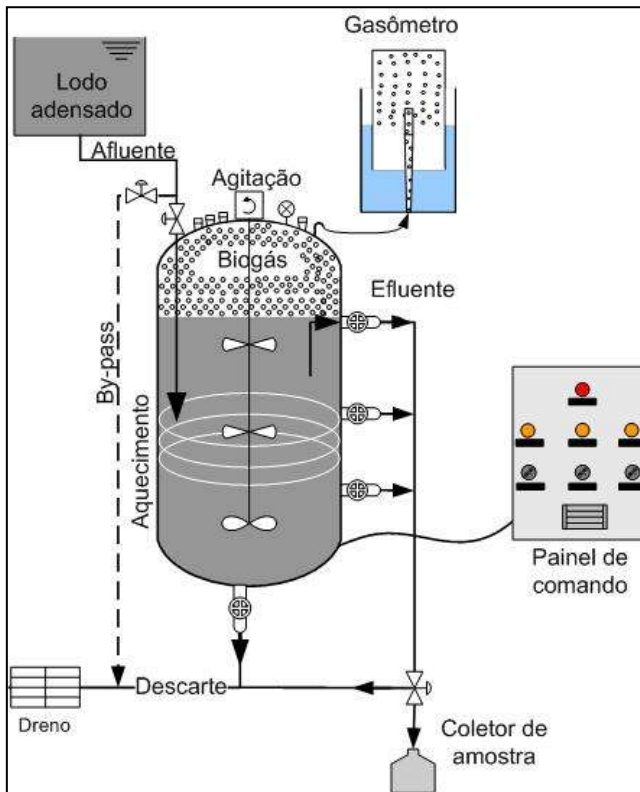


Figura 7- Representação esquemática do sistema de digestão anaeróbia de lodo adensado instalado na ETE Insular

Fonte: Leite (2011)

5.3 COLETA DE AMOSTRAS

A coleta de amostras para as análises microbiológicas foi realizada conforme USEPA (2003), da forma como prevê a Resolução CONAMA 375/2006, que dispõe sobre o uso agrícola de lodo de esgoto. A amostra foi acondicionada em frasco de polietileno para o transporte desde a ETE Insular até o laboratório para análise. Não foi necessário nenhum procedimento de preservação da amostra, pois foram analisadas imediatamente, ou encaminhadas para análise.

Segundo CONAMA (2006), para a caracterização inicial do lodo de ETE quanto aos parâmetros microbiológicos, devem ser coletadas pelo menos 15 amostras num período de três meses. Isto requer aproximadamente duas análises por semana. Quanto aos parâmetros físico-químicos, a amostragem deve ser de 4 amostras com defasagem mínima de 7 dias. Além disso, recomenda-se nesta mesma resolução que o período entre as amostragens seja, na medida do possível, uniforme. Devido à dificuldade de execução dos métodos e custo financeiro e temporal de algumas análises, esta recomendação não pode ser seguida.

O período de amostragem foi de julho a novembro de 2012 (17 semanas). A frequência de coleta de amostras foi de uma vez por semana, porém nem todos os parâmetros foram analisados com esta frequência. Neste sentido, o Apêndice 1 apresenta uma tabela com o resumo das análises realizadas para cada dia de coleta, assim como o respectivo código adotado na discussão dos resultados.

5.4 ANÁLISES LABORATORIAIS

As análises foram realizadas no Laboratório Integrado de Meio Ambiente (LIMA) e Laboratório de Microscopia do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, exceto *Salmonella* e metais pesados que foram enviadas para análise em laboratório terceirizado. As análises realizadas foram: identificação e quantificação de ovos de helmintos (Hel), quantificação de coliformes totais (CT) e fecais (CF), quantificação de *Salmonella* spp. (Sal), determinação de sólidos totais (ST) e voláteis (SV) e análise da concentração de metais pesados. Um resumo do método analítico e frequência de realização destas análises é mostrado na Quadro 10.

Quadro 10 - Método analítico e frequência das análises

Parâmetro	Método Analítico	Frequência
Ovos de Helmintos	Sedimentação (EPA 2003)	Semanal
Coliformes totais e fecais	Colilert Quanti Tray (SM* 9223 B)	Variável
<i>Salmonella</i>	Plaqueamento Seletivo	Mensal
Sólidos totais e voláteis	Gravimétrico; evaporação em chapas aquecidas (SM* 2540 G)	Semanal
Metais pesados	Variável**	Análise única

*Standard Methods for Examination of Water and Wastewater

** Ver item 5.4.4

5.4.1 Identificação e quantificação de ovos de helmintos (Hel)

A análise da presença e quantificação de ovos de helmintos no lodo seguiu a metodologia recomendada no Apêndice I de Control of Pathogens and Vector Attractions in Sewage Sludge (USEPA, 2003), com adaptações.

A sequência de procedimentos da análise tem o objetivo de separar e concentrar os ovos de helmintos no material e eliminar interferências, já que o lodo é previamente adensado na ETE, de forma que a contagem dos mesmos se torne mais precisa e representativa.

A EPA preconiza que a amostragem deve ser igual ou maior que 1000mL, contendo uma quantidade de aproximadamente 50gST/L de lodo. Considerando o fato de que o lodo afluente em questão possui em média 20,0 gST/L, e o lodo efluente, 5,0 gST/L, seriam necessários aproximadamente 2,5 L de amostra afluente e 10L de amostra efluente, para atender o requisito de USEPA (2003).

A análise de ovos de helmintos é trabalhosa e demorada, e depende da quantidade de amostra. Para o volume de amostra citado acima, seria necessário no mínimo dois dias para a realização da análise. Além disso, a questão mais restritiva é que o reator anaeróbio piloto possui volume de 100 L e uma quantidade grande de amostra retirada do mesmo iria desestabilizar o funcionamento do sistema.

Em um caso como este, seriam necessários equipamentos com maior capacidade para realizar a análise. Outra alternativa, em escala real, seria coletar o lodo após passar pelo processo de desidratação.

Portanto, realizou-se as análises com menos sólidos no lodo do que o requerido pela EPA. Por outro lado, a resolução CONAMA 375/2006 fixa o valor mínimo em 1000g de lodo (peso úmido), por isso atendeu-se este critério para a amostra digerida, que é mais fácil de trabalhar. Utilizou-se 500 mL de lodo afluente e 1000 mL de lodo efluente. Estas adaptações não prejudicaram a etapa final de contagem dos ovos e várias réplicas foram examinadas para diminuir possíveis erros.

O resumo das etapas da análise de ovos de helmintos é mostrado na Figura 8, as quais são: a amostra é batida em liquidificador, para quebrar partículas grandes (a); passa por uma sequência de etapas de sedimentação, para separar os ovos que são mais densos e sedimentam (b); é pressionada por uma peneira de 50 mesh (0,30 mm), a fim de eliminar os sólidos mais grosseiros (c); passa por centrifugação, para separar os ovos (que estão no sedimento) do restante da amostra (d); é adicionada a uma solução de Sulfato de Magnésio com densidade 1,2, para que os ovos boiem, separando-se da camada densa de sedimentos (e); é vertida por uma peneira de 400 mesh (0,038 mm), a qual o diâmetro dos poros é menor do que os ovos, retendo-os (f); é novamente centrifugada para concentrar os ovos, procedendo-se à etapa de exame em microscópio. Uma descrição mais detalhada do procedimento realizado é apresentada no fluxograma do Apêndice 2.

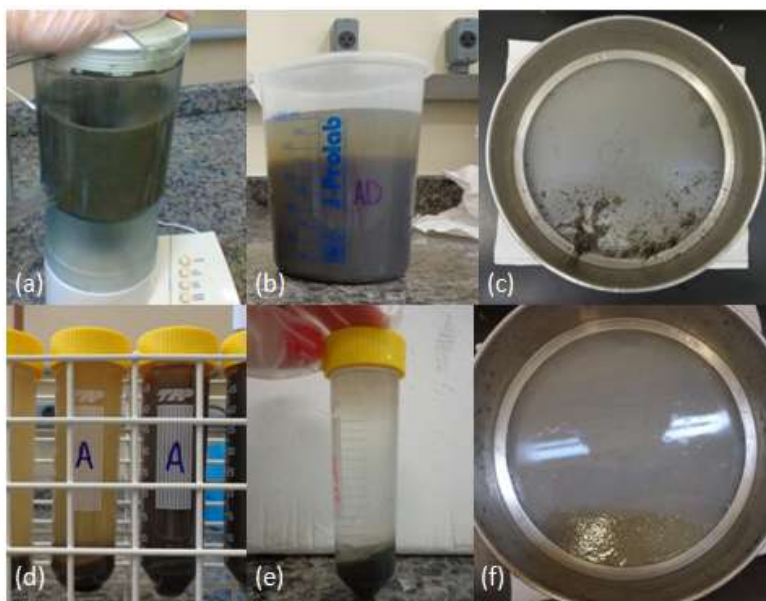


Figura 8 – Resumo das etapas da análise de ovos de helmintos

O número de ovos de helmintos por unidade de volume de lodo resulta da equação a seguir.

$$N = \frac{A \times X}{P \times V} \text{ [ovos/mL]}$$

Em que:

N = número de ovos por unidade de volume (mL) de amostra;

A = número de ovos contados na câmara McMaster ou média de duas ou três câmaras;

X = volume do produto final (ml);

P = volume da câmara de McMaster (0,3 ml) Obs. Se apenas um lado da câmara for contado, $P=0,15$.

V = volume da amostra original (mL)

Para transformar em número de ovos por unidade de massa de lodo, multiplica-se pela concentração de ST do mesmo, de acordo com a equação:

$$n = N \times ST \text{ [ovos/gST]}$$

Em que:

n = número de ovos por unidade de massa (g) de amostra;

N = número de ovos por unidade de volume (L) de amostra;

ST = concentração de sólidos totais da amostra (g/L).

5.4.2 *Quantificação de coliformes totais (CT) e fecais (CF)*

O método utilizado para a análise de coliformes totais e fecais foi a Técnica do Substrato Cromogênico Enzimático *Colilert Quanty Tray*, do laboratório IDEXX. Este é um método bastante utilizado por ser prático e de detecção rápida (24 horas), aceito pela EPA e Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2005) e bem difundido na literatura especializada (COELHO *et al.*, 2011; MARQUEZI, 2010; OLIVEIRA, 2003).

O método se baseia na tecnologia do substrato definido, ou seja, na identificação dos microrganismos pela análise de suas enzimas constitutíveis. Em função das reações químicas entre a enzima do microrganismo e o substrato enzimático adicionado, ocorre mudança de cor do meio, permitindo sua identificação. O substrato cromogênico utilizado para identificar coliformes totais é o orto-nitrofenil- β -D-galactopiranosídeo (ONPG) e o substrato fluorogênico utilizado para identificar *E. coli* é o 4-metilumbeliferil- β -D-glucoronídeo (MUG) (IDEXX, s. d.).

Para a realização deste teste, é necessário um kit de teste composto por cartelas de contagem e reagente (substrato). Além disso, os equipamentos necessários para esta análise são uma estufa bacteriológica a 35°C, uma lâmpada ultravioleta (365nm) e uma máquina seladora.

A amostra é preparada e diluída em vidraria esterilizada através de autoclavagem à 120°C por 20 minutos. Através de testes preliminares, verificou-se que a diluição da amostra AD deve ser de 5 vezes e da amostra DIG, 4 vezes.

Para a quantificação das amostras é utilizada a cartela Quanti Tray, que é preenchida com amostra. A seladora Quanti Tray é necessária para distribuir e selar a mistura da amostra com o reagente nas cavidades da cartela. A amostra, já em cartela, é incubada à 35°C em estufa bacteriológica por 24 horas.

Após o tempo de incubação das cartelas, o número de cavidades positivas (com coloração) é convertido em NMP/100mL através de uma tabela de conversão. A leitura do resultado nas cartelas Quanti Tray é feita da seguinte forma: cavidades amarelas representam os coliformes totais e cavidades amarelas/fluorescentes (indicadas pela lâmpada ultravioleta) representam os coliformes fecais ou *Escherichia coli*.

5.4.3 Quantificação de *Salmonella* spp. (Sal)

A análise da bactéria *Salmonella* spp. no lodo foi realizada no laboratório Econsulting, utilizando a metodologia de plaqueamento seletivo proposta por Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA; AWWA; WPCF, 2005). Foram realizadas duas análises com defasagem de um mês para a amostra digerida. As amostras foram acondicionadas em frascos plásticos e enviadas para o laboratório no mesmo dia em que foram coletadas.

5.4.4 Quantificação de Metais pesados

A análise dos metais pesados presentes no lodo foi realizada no laboratório Econsulting, utilizando as metodologias citadas no Quadro 11. Foi realizada uma análise de metais pesados na amostra digerida.

Quadro 11 – Metodologias utilizadas para a análise de metais pesados

Metal pesado	Metodologia de análise
Arsênio	SM* (3114 C)
Bário	SM (3120 D)
Cádmio	SM (3120 B)

Metal pesado	Metodologia de análise
Chumbo	SM (3120 B)
Cobre	SM (3120 B)
Cromo total	SM (3120 D)
Mercúrio	EPA (7471 A)
Molibdênio	SM (3120 D)
Níquel	SM (3120 B)
Selênio	SM (3114 C)
Zinco	SM (3120 B)

*Standard Methods for Examination of Water and Wastewater

5.4.5 Determinação de Sólidos totais (ST) e voláteis (SV)

Realizou-se a análise de sólidos totais e voláteis a fim de analisar a estabilidade do lodo efluente, verificando desta forma seu enquadramento para aplicação na agricultura, conforme a Resolução CONAMA 375/2006. Além disso, a determinação dos sólidos totais das amostras também tem como finalidade complementar a representação do resultado das análises de ovos de helmintos, já que o limite estabelecido deste parâmetro nesta resolução é dado em ovos viáveis/gST.

Realizou-se a análise deste parâmetro pelo método gravimétrico, de acordo com (APHA; AWWA; WPCF, 2005). Este método consiste na determinação do peso da amostra após passar pela temperatura de 100°C em estufa e 550°C em mufla. A 100°C, toda a umidade da amostra evapora, restando somente sólidos totais. Já a 550°C, a matéria orgânica (SV) evapora, restando apenas os sólidos fixos (SF). A amostra é colocada em cadinhos de porcelana, os quais são pesados também antes do início da análise. Antes de qualquer pesagem, o material é deixado em dessecador para esfriar sem ganhar umidade. O peso resultante da amostra e o volume inicial da mesma fornecem o valor de ST, STF e STV, conforme segue:

$$ST = \frac{(P_1 - P_0) \times 1000}{V_1} [g/L]$$

Em que:

P_0 : Peso do cadinho seco (g)

P_1 : Peso do cadinho e amostra após passar pela estufa (g)

V_1 : Volume inicial de amostra (mL)

$$STF = \frac{(P_2 - P_0) \times 1000}{V_1} [g/L]$$

Em que:

P_0 : Peso do cadinho seco (g)

P_2 : Peso do cadinho e amostra após passar pela mufla (g)

V_1 : Volume inicial de amostra (mL)

Então:

$$STV = ST - STF [g/L]$$

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS

6.1.1 Metais pesados

Conforme se observa na Quadro 12, todos os metais pesados analisados no lodo efluente estão abaixo do limite estabelecido pela Resolução CONAMA 375/2006. Arsênio, Mercúrio, Molibdênio e Selênio estão em concentração abaixo do limite de detecção do método utilizado. Este resultado poderia ser previsto devido à inexistência de contribuições industriais afluentes ao sistema de tratamento da ETE Insular, as quais são considerados as principais fontes desse tipo de contaminante (BERTON, 2000).

Quadro 12 – Concentração de metais pesados no lodo

Metal pesado	Teor no lodo efluente (mg/kg)	Limite CONAMA 375 (mg/kg)	Proporção lodo/CONAMA (%)
Arsênio	< 1,5	41	3,7
Bário	266,4	1300	20,5
Cádmio	1,05	39	2,7
Chumbo	38,91	300	13,0
Cobre	518,5	1500	34,6
Cromo total	43,24	1000	4,3
Mercúrio	< 0,15	17	6,8
Molibdênio	< 0,5	50	1,0
Níquel	51,88	420	12,4
Selênio	< 2,0	100	2,0
Zinco	1045,3	2800	37,3

Tão importante quanto conhecer a carga poluidora inorgânica do lodo, é conhecer a carga acumulada no solo o qual se pretende aplicar o lodo. De acordo com Pegorini (2002), o controle das cargas de metais adicionadas aos solos é fundamental num programa de reciclagem agrícola de lodo, uma vez que as consequências a longo prazo do acúmulo destes elementos nos solos não são conhecidas por completo e constituem tema bastante polêmico entre a comunidade científica nacional e internacional. Desta forma, a Resolução CONAMA 375/2006 trata desta questão, abordando a carga máxima de contaminantes no solo e a taxa máxima de aplicação do lodo, dentre outras diretrizes.

Os metais em maior quantidade no lodo são o zinco e o cobre. Suas concentrações correspondem a, respectivamente, 37,3% e 34,6% (Quadro 12) do limite estabelecido pela Resolução citada acima. Estes são, portanto, os elementos limitantes para a aplicação do lodo no solo, embora estas concentrações correspondam a valores típicos para lodos de ETE – Cu: 500 mg/kg, Zn: 1700 mg/kg (METCALF e EDDY, 2003).

O resultado quanto a maior presença de Zn e Cu é corroborado pelas pesquisas de Pegorini (2002) e Tsutiya (2000). Pegorini (2002) obteve uma média de concentração de Zn de 383,96 mg/kg e Cu de 85,90 mg/kg para uma ETE de Curitiba recebendo apenas efluentes domésticos; enquanto que Tsutiya (2000) obteve valores médios de 832,6 mg/kg e 1873,0 mg/kg, para cobre e zinco respectivamente, em uma ETE de São Paulo com contribuição industrial.

6.2 INDICADORES BACTERIOLÓGICOS E AGENTES PATOGENICOS

6.2.1 *Ovos de helmintos*

Foi observada baixa quantidade de ovos de helmintos nas amostras, principalmente a partir da metade do mês de setembro (amostra 10), como pode ser observado na Figura 9. Ressalta-se que a menor quantidade de sólidos do que o requerido nas análises, conforme mencionado no item 5.4.1, tem como consequência a menor probabilidade de recuperar ovos em amostras que naturalmente tem poucos, aumentando a possibilidade de incorrer em erros nas análises. (OGE, H.; OGE, S., 2000)

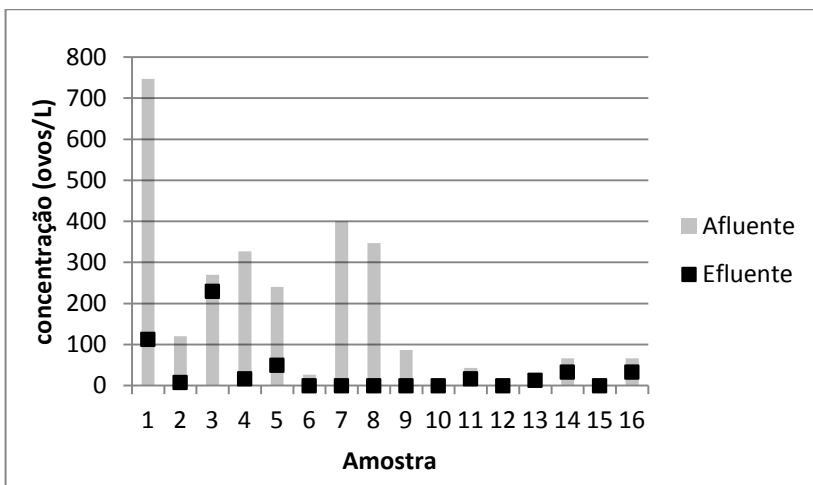


Figura 9 - Concentração de ovos de helmintos nas amostras do lodo afluente e efluente

Pode-se verificar a existência de dois grupos distintos para os resultados obtidos. Do mês de julho à metade de setembro (amostras 1 a 9 – grupo 1), a quantidade de ovos na amostra adensada foi superior à metade dos ovos de helmintos encontrados no lodo entre setembro e novembro (amostras 10 a 16 – grupo 2). Enquanto que no primeiro grupo (meses de prevalência da estação inverno) a média foi de 285,0 ovos/L, no segundo grupo (primavera) esta média foi de 25,2 ovos/L, aproximadamente 10 vezes menor. Na amostra digerida não houve muita variação, tendo uma média de 32,2 ovos/L.

Paulino, Castro e Thomaz-soccol (2001) analisaram a presença e a viabilidade de ovos de helmintos em ETEs da região metropolitana de Curitiba/PR depois de passarem pelo tratamento com reator anaeróbio de leito fluidizado (RALF). O autor observou uma diferença significativa quanto ao número de ovos viáveis de helmintos presentes no material de quatro estações estudadas. Os valores variaram de uma média de 25,6 ovos viáveis/L a 683,4 ovos viáveis/L no lodo efluente das diferentes ETEs. Os valores encontrados no presente estudo estão próximos ao obtido pelos autores.

A fim de verificar se a baixa incidência de ovos no lodo era coerente, realizou-se uma análise qualitativa – presença e densidade - de ovos de helmintos no esgoto afluyente a estação de tratamento de esgoto (ponto de coleta: calha parshall). Em 1L de esgoto, foi observado apenas 1 ovo de Ancilostomídeo em um dos dois métodos testados (método de Faust) e nenhum no outro método (método de Bailenger). Isto comprova que o número de ovos afluentes a estação de tratamento é realmente muito baixo.

A quantidade de ovos está relacionada com as condições de saneamento e a qualidade de vida da população. Florianópolis é uma capital com elevada qualidade de vida. De acordo com o Ministério da Saúde (BRASIL, 2005), a proporção de internações em hospitais por doenças parasitárias e infecciosas em 2005 em Florianópolis foi de 4,90%, abaixo da média do estado. Dentre os estados da Federação, Santa Catarina (5,81%) está apenas atrás de São Paulo (4,88%) e do Distrito Federal (5,23%). Quanto às capitais, Florianópolis está atrás de 4 delas: Cuiabá (4,34%), Curitiba (4,63%), São Paulo (4,01%) e Salvador (4,70%). Na Região norte, onde estão as piores condições, a média é de 14,17%, aproximadamente três vezes mais que Florianópolis. Este índice pode ser considerado um indicador da qualidade de vida e de saneamento da região, o que pode explicar a baixa incidência de ovos obtida.

A presença de larvas de helmintos também foi analisada. Verificou-se a ocorrência de larvas de *ancilostomatídeos* (Figura 10) com maior frequência no primeiro período e com reduzida frequência no segundo. Muitas das larvas encontradas estavam móveis e, portanto, viáveis em amostras adensada (amostras 4, 6, 12 e 16), e em uma amostra digerida (amostra 3), indicando que o processo de digestão anaeróbia pode ainda manter helmintos viáveis nas condições operacionais testadas.



Figura 10 - Larva de ancilostomatídeo em amostra de lodo (aumento de 40x)

Além de se determinar a presença de ovos de helmintos, a determinação da viabilidade é necessária para a interpretação do resultado final. Segundo USEPA (2003), o único ovo de helminto que pode ter a sua viabilidade determinada é o de *Ascaris*. Além disso, *Ascaris* é o helminto mais resistente a condições adversas (temperatura, pH, etc), portanto, se as condições forem tais que não permitam a sua sobrevivência, nenhuma outra espécie sobreviverá.

Realizou-se o teste de viabilidade nas amostras coletadas, incubando o material com os ovos por 28 dias a 26°C, conforme estabelecido por USEPA (2003). Em todas as amostras analisadas depois deste período, apenas um ovo de *Ascaris* foi encontrado (amostra 14), e este não estava viável. A baixa quantidade de ovos de *Ascaris* nas amostras prejudicou a análise de viabilidade.

É importante mencionar que no procedimento de incubação em estufa foi observada a formação de fungos na maioria das amostras, apesar da existência de ácido sulfúrico 0,1N em cada frasco de amostra para evitar este problema. Foi testada ainda a limpeza dos frascos em ácido sulfúrico 0,1 N previamente a sua utilização, além da limpeza e esterilização da estufa. Este último procedimento beneficiou a análise, diminuindo a quantidade de fungos, porém, não eliminando. Na Figura 11 são mostrados fungos visualizados em uma amostra afluyente, na qual também é possível observar a presença de corpos de frutificação do fungo, estruturas que se assemelham a ovos de helmintos.

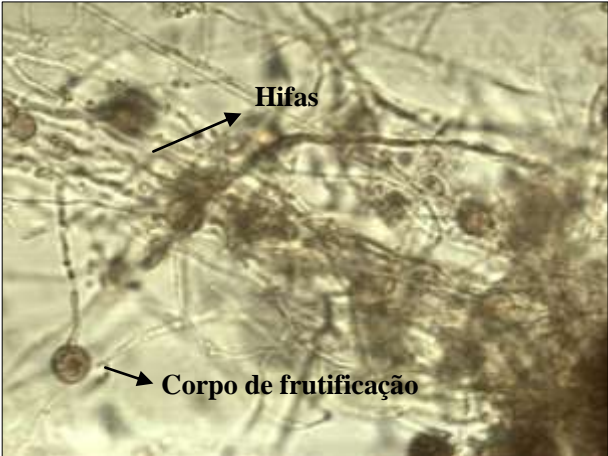


Figura 11 – Fungos visualizados em uma amostra afluyente (aumento de 400x)

Entretanto, sabendo-se que o número de ovos viáveis é menor ou igual ao numero de ovos totais encontrados numa amostra, pode-se inferir a classificação dessa amostra pelo número de ovos totais. Assim, comparou-se os dados de ovos totais (viáveis e não-viáveis) com o padrão da Resolução CONAMA 375/2006. A Figura 12 apresenta a concentração de ovos totais por massa de ST nas amostras, bem como os limites de classificação de CONAMA (2006).

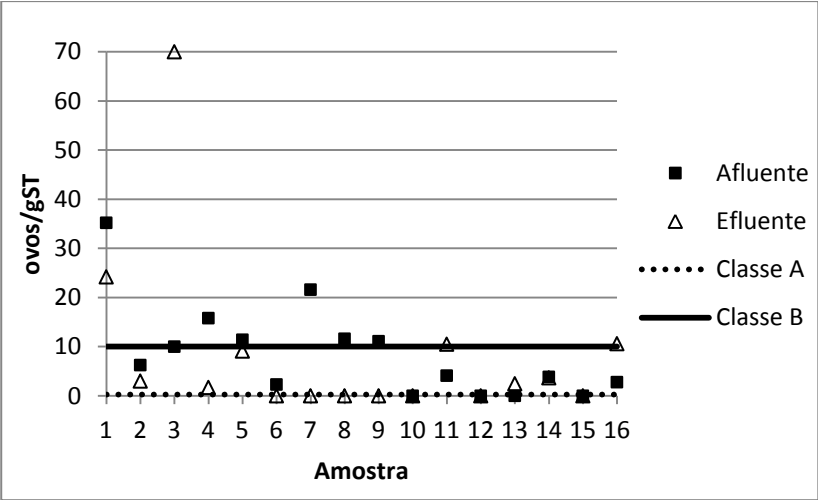


Figura 12 – Ovos de helmintos por gramas de ST no lodo

O lodo afluyente apresentou baixa quantidade de ovos, estando em muitas amostras dentro da classe B. Da mesma forma, as concentrações do lodo efluente estiveram dentro da classe B, com exceção das amostras 1 e 3. Para a caracterização inicial de parâmetros microbiológicos do lodo, a Resolução CONAMA 375/2006 estabelece que deverão ser coletadas pelo menos 15 amostras em 3 meses, e todas devem apresentar os parâmetros abaixo do limite estabelecido. Como trata-se apenas de uma caracterização preliminar, e foram coletadas 16 amostras em 4 meses, o lodo efluente será enquadrado na classe B pois grande parte das amostras estavam abaixo do limite.

A maior quantidade de ovos por unidade de massa foi encontrada em uma amostra digerida (amostra 3), com concentração de 70 ovos/gST. Apesar deste valor ser maior em relação à respectiva amostra adensada (10 ovos/gST), quando se compara em termos de ovos por unidade de volume, observa-se o número de ovos afluentes foi maior que a quantidade de ovos efluentes. Na amostra adensada havia 270 ovos/L e na amostra digerida 230 ovos/L. Portanto, houve mais ovos por unidade de massa na amostra digerida pois esta possuía pequena quantidade de sólidos totais.

Desprezando-se a amostra 3, visto o resultado anormal observado, a média de ovos na entrada do sistema foi de 8,4 ovos/gST e na saída de 4,5 ovos/gST. Em termos de volume, as médias foram 171,3 e 32,2 ovos/L, para afluyente e efluente, respectivamente.

Em uma pesquisa paralela com o lodo bruto desidratado da ETE Insular e depois de passar pelo processo de compostagem termofílica, Teixeira (2012) encontrou a concentração de 0,0236 ovos viáveis/gST. O autor ressaltou que este valor está muito abaixo em relação àquele encontrado por outras ETEs e que isto pode estar relacionado à elevada qualidade de vida da população de Florianópolis.

De acordo com USEPA (2003), a análise de vírus entéricos e ovos de helmintos no lodo pode ser complicado porque às vezes eles não estão presentes no lodo de esgoto bruto. Neste caso, uma ausência de organismos no lodo tratado não significa que o processo os eliminou. Por isso a importância em analisar estes parâmetros no lodo afluyente ao sistema. Neste estudo, a remoção dos ovos variou bastante, atingindo de 0 a 1 log de eficiência.

Diferentemente da bibliografia especializada (CARRIJO, 2004; PAULINO; CASTRO; THOMAZ-SOCCOL, 2001), o ovo com maior incidência no lodo não foi o de *Ascaris*, mas sim o de Ancilostomídeo. Na amostra afluyente, 75% do total de ovos encontrados foram de Ancilostomídeos. No efluente, esta proporção foi ainda maior, 86%, conforme mostrado na Figura 13. As espécies encontradas no lodo são mostradas na Figura 14.

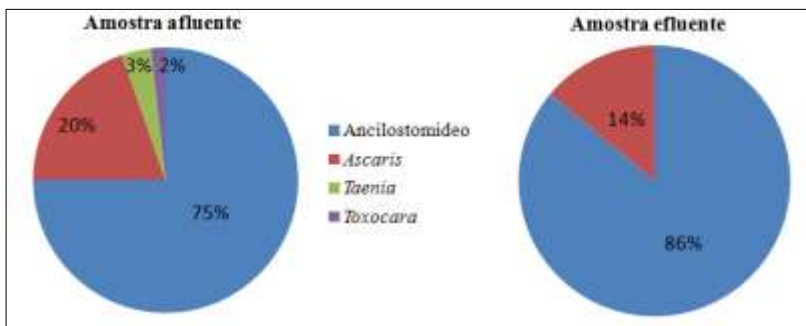


Figura 13 - Proporção de espécies de helmintos nas amostras afluyente e efluente

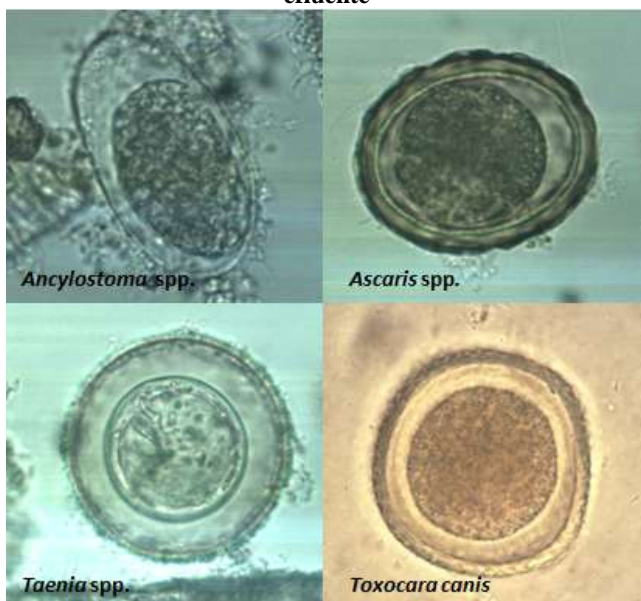


Figura 14 - Espécies de ovos de helmintos encontradas no lodo em (aumento de 400x)

Na amostra efluente houve uma menor variedade de ovos que na amostra afluyente, predominando o ovo de Ancilostomídeo. Isto pode ser explicado pois o ovo de Ancilostomídeo é o menos denso ($1,06 \text{ g/cm}^3$, ver Quadro 4), portanto, sedimenta mais lentamente. Considerando que o efluente do digestor é coletado após uma prévia sedimentação no interior do digestor de aproximadamente 3 horas, os ovos mais pesados estariam no fundo do digestor enquanto que os menos densos estariam em suspensão saindo no efluente.

A areia úmida é o meio ideal para o desenvolvimento do Ancilostomídeo. A contaminação da areia se dá por causa dos esgotos lançados no mar e das fezes de animais domésticos. Por sua característica geológica, o solo arenoso constitui importante foco de infecção humana por parasitos. As partículas de areia com diâmetros que variam de 0,02 a 2 mm têm a capacidade de reter água nos ângulos e espaços da estrutura porosa do solo. (REY, 2001 *apud* SANTIAGO; GAGLIANI, 2011)

Segundo Oliveira Filho *et al.* (2011), a sobrevivência das formas infectantes no solo ocorre quando estas encontram condições adequadas, como por exemplo, a alta umidade e a baixa exposição à luz solar. Portanto, a probabilidade de contrair uma parasitose é mais alta em determinadas épocas do ano.

Por ser uma ilha, cercada por praias, a contaminação parasitária de Florianópolis pode ser influenciada pelos helmintos presentes na areia. Estudos que analisaram a areia de praias no Brasil comprovam a maior prevalência de ovos e larvas de Ancilostomídeos nestes locais. (ROCHA, 2011; MATESCO, 2006; SANTOS, 2006 *apud* SANTIAGO; GAGLIANI, 2011)

Em estudo realizado por Cantos (2004) *et al.*, a fim de verificar a contaminação parasitária de hortaliças comercializadas em Florianópolis, detectou-se a ocorrência em algumas amostras de larvas e ovos de Ancilostomídeo, o qual estava em quantidade muito mais expressiva em relação ao único outro helminto encontrado, *Strongyloides stercoralis*.

Por outro lado, Kunz (2008) *et al.*, analisando a contaminação parasitária em uma escola municipal de Cachoeira do Bom Jesus - Florianópolis, obteve como resultado uma maior prevalência do helminto *Ascaris lumbricoides*, não sendo verificada contaminação por Ancilostomídeo.

Em relação à Florianópolis, a estação de tratamento de esgotos Insular não recebe as águas residuárias de áreas de praias, desta forma, é possível que nas épocas mais quentes (primavera e verão) a maior parte da população esteja nas praias o que diminui a contaminação parasitária do esgoto da região central.

Um fato inesperado foi que em praticamente todas as amostras adensadas e na maioria das amostras digeridas encontrou-se ovos de ácaros, além do próprio ácaro morto. O ácaro encontrado (Figura 15), conhecido como ácaro doméstico, vive em colchões, tapetes, etc. e é responsável por causar alergia no ser humano. Estes ácaros não causam danos maiores e geralmente não resistem ao tratamento de esgoto. Carrijo (2004) também mencionou a presença destes animais em lodo que passou pelo processo de digestão anaeróbia em sistema do tipo Reator Anaeróbio de Lodo Fluidizado (RALF).

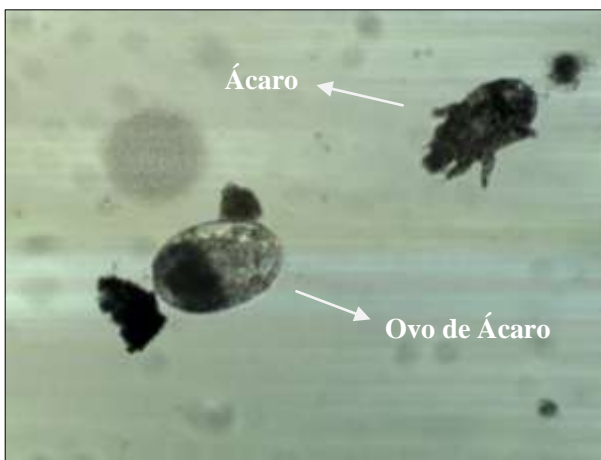


Figura 15 – Ácaro e ovo de ácaro encontrados em uma amostra afluyente (aumento de 100x)

Em microscópio óptico, foi visualizado, em praticamente todas as amostras adensadas, partículas orgânicas de variadas dimensões (Figura 16), o que dificultou a contagem de ovos.

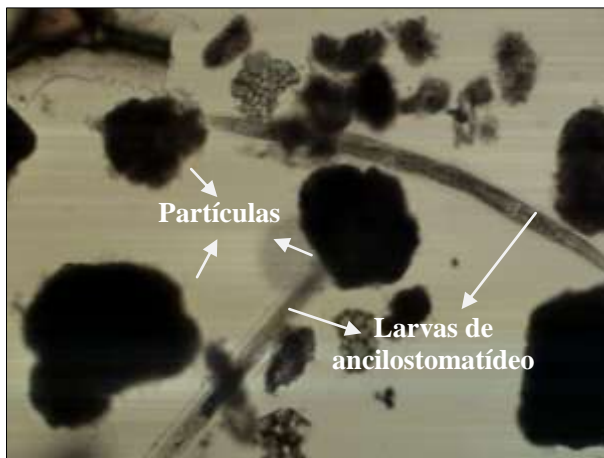


Figura 16 – Partículas cristalinas visualizadas em microscópio (aumento de 100x)

6.2.2 Coliformes totais e fecais

O resultado das análises de coliformes totais e fecais é mostrado no Quadro 13.

Quadro 13 - Coliformes totais e fecais no lodo

Código da amostra	Coliformes totais		Coliformes fecais	
	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
17	1,75E+07	3,07E+06	1,99E+06	4,87E+05
18	2,38E+06	5,25E+05	8,57E+05	1,19E+05
16	2,54E+05	3,22E+05	1,25E+05	2,23E+05
19	2,71E+06	1,25E+07	9,55E+05	6,03E+06

Para a caracterização inicial de parâmetros microbiológicos do lodo, a Resolução CONAMA 375/2006 estabelece que deverão ser coletadas pelo menos 15 amostras em 3 meses. Porém, neste trabalho foi realizada apenas uma caracterização preliminar, devido à demanda de custo e tempo da análise.

O limite estipulado pela USEPA (2003) para coliformes termotolerantes para a classe B é 10^6 NMP/gST. Observa-se que o lodo tem concentração de CF abaixo deste limite nas amostras digeridas analisadas, enquadrando-se na classe B.

O Quadro 14 mostra a redução de coliformes pelo processo de digestão anaeróbia estudado, em função da massa de amostra e em função do volume de amostra.

Quadro 14 – Redução (em log) de coliformes no processo de digestão anaeróbia

Código da amostra	Redução em gST de amostra		Redução em L de amostra	
	CT	CF	CT	CF
17	0,76	0,61	1,19	1,04
18	0,66	0,86	1,08	1,28
16	-0,10	-0,25	0,78	0,63
19	-0,66	-0,80	-0,23	-0,36

O resultado em massa desfavorece a comparação de resultados com a literatura visto que a massa de ST para a amostra digerida é inferior a amostra adensada, dada a eficiência de remoção de sólidos a ser discutida nos próximos itens. Desta forma, a eficiência de remoção será comparada considerando-se o volume de amostra, que é um valor fixo tanto no afluente como efluente.

Observa-se que na amostra 19 houve uma redução negativa tanto para coliformes totais quanto para coliformes fecais, ou seja, houve mais coliformes na saída do sistema do que na entrada. Isto é pouco provável, pois coliformes fecais não se reproduzem no ambiente (BASTOS, 2000).

A média de remoção de CT (desconsiderando a amostra 19) é de 1,01 log e de CF é de 0,98 log. Estes valores estão de acordo com o descrito por Tamimi *et al.* (2010), que observou 1 a 2 logs de redução de bactérias no processo de digestão anaeróbia. Os valores também estão próximos ao encontrado por outros autores, que trabalharam com digestão anaeróbia a 35°C e tempo de detenção hidráulico de 20 dias: Bonjoch e Blanch (2009) obtiveram média de 1,5 log e Gantzer (2001), de 1,5+-0,6 log. De acordo com Paulino, Castro e Thomaz-soccol (2001), no tratamento biológico baseado na digestão anaeróbia, a eficácia depende do tempo e da temperatura. No presente estudo o TDH foi de 7 dias, abaixo daquele da bibliografia citada, podendo assim ser explicado o menor valor de eficiência encontrado.

6.2.3 *Salmonella* spp.

Nas duas análises mensais de *Salmonella* spp. realizadas no lodo efluente, este gênero de bactéria esteve ausente (Quadro 15), requisito para enquadramento na classe A, que estabelece a ausência desta bactéria em 10g de ST. Lodos classe B dispensam a análise deste parâmetro.

Quadro 15 – Concentração de *Salmonella* spp. no lodo efluente

Data	Código da amostra	Resultado
11-out	20	Ausente
29-nov	21	Ausente

De acordo com WEF (1995) *apud* Andreoli (2001), as bactérias do gênero *Salmonella* são normalmente encontradas em número reduzido no lodo bruto (30 a 4,6 x 10⁵ bactérias/100mL), e valores mais baixos ainda são encontrados após o tratamento com digestão anaeróbia (30 a 620 bactérias/100mL).

6.3 ESTABILIDADE

6.3.1 *Sólidos totais e voláteis*

A Resolução CONAMA 375/2006 faz referência aos sólidos, como parâmetro de enquadramento de lodos de esgoto, quanto à estabilidade do lodo e ao potencial de atratividade de vetores.

Quanto à estabilidade, esta legislação estabelece que o lodo de esgoto será considerado estável se a relação entre sólidos voláteis e sólidos totais for menor que 0,7, isto é $SV/ST < 0,7$. A Figura 17 mostra os valores obtidos para a relação SV/ST para o lodo adensado e o lodo digerido obtidos neste estudo.

Em geral, nota-se que o lodo afluente ao sistema se apresentou instável, justificando a necessidade de uma estabilização. Já no efluente, o resultado obtido atendeu o recomendado pela legislação vigente, apresentando um valor máximo de 0,67. Portanto, o processo de digestão anaeróbia mostrou-se eficiente na destruição da matéria orgânica presente no lodo adensado.

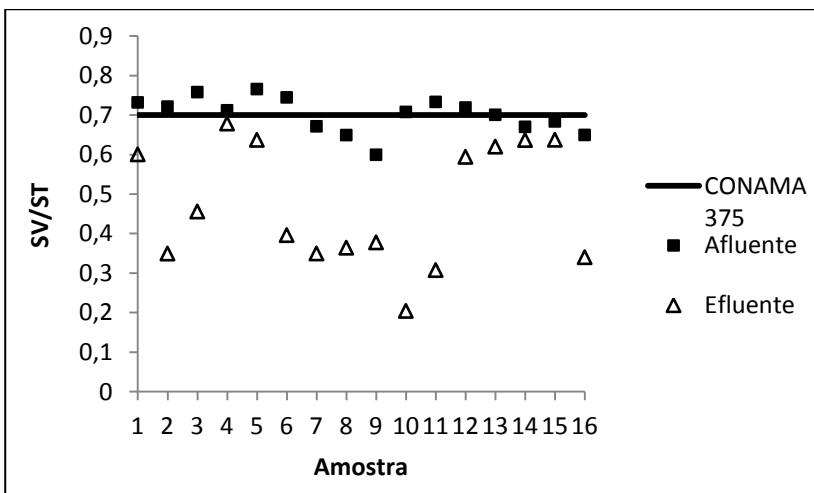


Figura 17 – Relação SV/ST no lodo afluente e efluente

Segundo a legislação vigente, a redução de atratividade de vetores é alcançada quando a eficiência de remoção de sólidos voláteis no processo de digestão anaeróbia alcançar valor mínimo de 38%. Isto é, a eficiência do processo de digestão anaeróbia for igual ou superior a este parâmetro. Conforme pode ser observado na Figura 18 a redução de sólidos voláteis pelo digestor anaeróbio foi sempre maior que o requerido. Em média, houve uma remoção de 82% de sólidos voláteis, enfatizando um excelente funcionamento do sistema.

De acordo com Andreoli (2006), a redução de SV no processo de digestão anaeróbia de lodos varia entre 35% e 60%, dependendo da natureza do lodo de esgoto e das condições operacionais do sistema. Percebe-se então que o presente digestor anaeróbio piloto apresentou um comportamento ainda mais eficiente que o abordado na literatura.

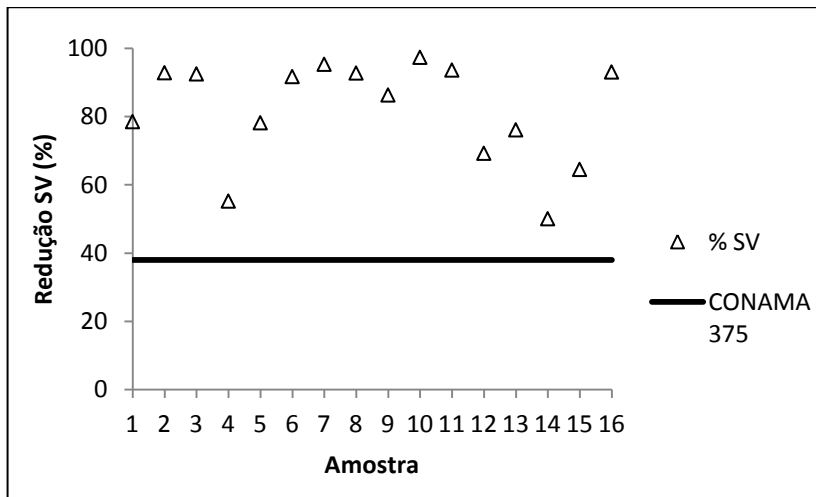


Figura 18 - Remoção de STV no processo de digestão anaeróbia

6.4 AVALIAÇÃO DA PERSPECTIVA DE REÚSO

A Resolução CONAMA 375/2006 estabelece quatro requisitos quando o reúso do lodo de ETE na agricultura é visado: potencial agrônomo, substâncias inorgânicas e orgânicas potencialmente tóxicas, indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos e estabilidade. Neste trabalho, apenas o potencial agrônomo e as substâncias orgânicas potencialmente tóxicas não foram avaliados. O Quadro 16 apresenta um resumo das características do biossólido gerado, com vistas ao reúso agrícola.

Quadro 16 – Resumo das características do biossólido

Indicadores	Características do biossólido
Substâncias Inorgânicas <i>As, Ba, Cd, Pb, Cu, Cr, Hg, Md, Ni, Se, Zn</i>	Inferiores à concentração máx. permitida
Indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos <i>Coliformes fecais</i> <i>Ovos de helmintos</i> <i>Salmonella spp.</i>	Classe B Classe B Classe A

Indicadores	Características do biossólido
Estabilidade <i>Relação SV/ST</i> <i>Atratividade de vetores</i>	Lodo estável Reduzida

O resultado das análises para os parâmetros substâncias inorgânicas e estabilidade atenderam o limite estabelecido para o uso agrícola do lodo. Os elementos zinco e cobre se destacaram com as maiores concentrações (1045,3 mg/kg e 518,5 mg/kg, respectivamente), embora não apresentem risco conforme a legislação vigente. O processo biológico aplicado para estabilização do lodo reduziu em média 82% do conteúdo do lodo bruto resultando em um resíduo estável. A remoção mínima de 38% de SV estabelecida para que o lodo tenha menor atratividade de vetores foi atendida, apesar do baixo TDH operacional (7 dias).

Não foi detectada a presença de *Salmonella* spp. no lodo efluente e as concentrações de coliformes fecais foram reduzidas em média 1 log, mantendo-se abaixo do limite da legislação durante o período analisado. A remoção de ovos de helmintos sofreu bastante variação, atingindo de 0 a 1 log de eficiência durante o processo de digestão anaeróbia, entretanto, os requisitos da classe B foram atendidos. Desta forma, o lodo de ETE submetido à digestão anaeróbia mesofílica, com um TDH de 7 dias a 35°C, apresentou características físico-químicas que atestam seu reúso agrícola e características microbiológicas suficientes para classificá-lo como um biossólido classe B.

De acordo com Luduvic (2000), o biossólido classe B produzido em uma ETE de Brasília era disponibilizado para uso em três estados do Brasil, sendo utilizado no plantio de milho, cana-de-açúcar, fruticultura, recuperação e formação de pastagens, plantio de essências florestais, plantas ornamentais, recuperação de áreas degradadas e café. O biossólido apresentou vantagens em termos de nitrogênio e fósforo sobre o fertilizante mineral para distâncias de até 117 km da ETE, além de não apresentar riscos epidemiológicos.

Não foram encontrados dados referentes ao reúso agrícola de lodo em Florianópolis. No entanto, sugere-se a aplicação de um biossólido classe B em culturas para produção de fibras para fins têxteis, atividade econômica expressiva na região do vale do Itajaí. Além disso, sendo a silvicultura a terceira principal atividade rural na composição do PIB agrícola do estado de Santa Catarina, o incentivo ao uso de biossólido classe B nesta atividade na região do planalto catarinense poderia apresentar benefícios ambientais como a conservação do solo e o reflorestamento, através da valorização do lodo de esgoto. A IMPORTÂNCIA... (2008)

7 CONCLUSÕES

Quanto à presença de metais pesados no lodo, verificou-se que o lodo apresentou concentrações inferiores aos limites estabelecidos pelo CONAMA 375/2006 para o reúso agrícola. Em relação ao conteúdo orgânico, o processo de digestão anaeróbia produziu um resíduo estável com reduzida concentração de sólidos voláteis o que repercutiu em sua baixa atratividade de vetores.

A qualidade sanitária do lodo foi avaliada a partir das análises das bactérias do gênero *Salmonella*, grupo Coliformes e número de ovos de helmintos. As concentrações de ovos de helmintos no lodo efluente mantiveram-se inferiores ao limite da legislação. Não foram detectadas *Salmonella* spp. e a estabilização reduziu os coliformes uma unidade log. Esta redução foi suficiente para enquadramento do lodo na classe B conforme o CONAMA 375/2006.

Outro resultado positivo observado foi a redução do volume seco de lodo pelo processo de digestão anaeróbia, através da remoção de sólidos voláteis. Este fator implica em menor quantidade de lodo a ser disposto. Os sólidos foram transformados em biogás, o qual pode ser aproveitado energeticamente para, por exemplo, aquecimento do digestor. Assim é possível fechar o ciclo do tratamento do lodo com o aproveitamento completo dos subprodutos dos processos tecnológicos aplicados.

Tendo em vista os resultados obtidos, a aplicação deste biossólido na agricultura apresenta um elevado grau de segurança sanitária e ambiental. Para garantir essa segurança, as diretrizes no momento de utilização deste lodo devem ser respeitadas. Por ser classe B, existem restrições de locais para aplicação e cuidados com o manejo. Destaca-se a necessidade de análises mais frequentes, respeitando a amostragem indicada na Resolução CONAMA 375/2006.

Para próximos estudos, sugere-se a realização de teste com inoculação de ovos de *Ascaris suum* no lodo afluente, já que o lodo em questão apresentou baixas concentrações de ovos, o que prejudicou a análise de eficiência de remoção deste microrganismo no processo de digestão anaeróbia. Desta forma, será também possível avaliar a viabilidade dos ovos de *Ascaris* após 28 dias, e assim comparar com o limite da legislação.

Sugere-se ainda a realização de mais estudos com digestão anaeróbia em temperatura termofílica, verificando o seu enquadramento na classe A, já que, com o tempo, o lodo classe B pode ser retirado da Resolução CONAMA 375/2006.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A IMPORTÂNCIA DA SILVICULTURA. **A Notícia**, 21 set. 2009. Disponível em: <<http://www.clicrbs.com.br/anoticia/jsp/default2.jsp?uf=2&local=18&edition=21278>>. Acesso em: 28 jan. 2013.

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. **Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final**. Belo Horizonte: UFMG, 2001. 484 p.

ANDREOLI, Cleverson Vitorio (Coord.). PROGRAMA DE PESQUISA EM SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL). **Biossólidos: Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Curitiba: ABES, 2006. 398 p.

ANDREOLI, Cleverson Vitorio (Coord.). PROGRAMA DE PESQUISA EM SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL). **Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final**. Curitiba: ABES, 2001. 257 p.

ANDREOLI, Cleverson Vitorio (Coord.). PROGRAMA DE PESQUISA EM SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL). **Uso e manejo de lodo de esgoto na agricultura**. Rio de Janeiro: ABES 1999. 97 p.

APHA, AWWA, WPCF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21. ed. Washington: American Public Health Association, 2005.

ASTALS, S. *et al.* Balancing hygienization and anaerobic digestion of raw sewage sludge. **Water Research**. v. 46, p. 6218-6227, 2012.

BASTOS, R. K., BEVILACQUA, P. D., & KELLER, R. Organismos patogênicos e efeitos sobre a saúde humana. In: GONÇALVES, R. F. **Desinfecção de efluentes sanitários**. Rio de Janeiro: ABES; São Paulo, RiMa, 2003. p. 27-88.

BASTOS, Rafael K. X. **Coliformes como indicadores da qualidade da água: alcance e limitações**. In: XXVII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – AIDIS, Porto Alegre, 2000.

BASTOS, Veridiana Karmann. **Detecção e quantificação de ovos viáveis de *Ascaris* sp e de outros helmintos em lodo de esgoto.** 2012. 82 f. Dissertação (Mestre em Ciências) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

BERTON, R. S. Riscos de contaminação do agroecossistema com metais pesados. In: BETTIOL, Wagner; CAMARGO, Otávio. A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto.** Jaguariúna: EMBRAPA, Meio Ambiente, 2000. p. 259-268.

BETTIOL, Wagner; CAMARGO, Otávio A. (Ed.). **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura.** Jaguariúna: EMBRAPA, Meio Ambiente, 2006. 349 p.

BONJOCH, X.; BLANCH, A. R. Resistance of Faecal Coliforms and Enterococci Populations in Sludge and Biosolids to Different Hygienisation Treatments. **Environmental Microbiology**, v. 57, p. 478-483, 2009.

BRASIL. Ministério da saúde. RIPSa - Rede Interagencial de Informações para a Saúde. **Indicadores de morbidade e fatores de risco.** 2005. Disponível em: <http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/defthtm.exe?idb2006/d13.def>. Acesso em 02 de janeiro de 2012.

BRASIL. Ministério das Cidades. Sistema nacional de informações sobre saneamento. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto.** 2010.

CANTOS, Geny Aparecida *et al.* Estruturas parasitárias encontradas em hortaliças comercializadas em Florianópolis, Santa Catarina. **Revista NewsLab.** ed 66. 2004.

CARRIJO, Juliana Rosa. **Pesquisa de ovos de helmintos em lodo de esgoto oriundo de Campo Grande (MS) após tratamento anaeróbico.** 2004. 54 f. Dissertação (Mestrado em Medicina Veterinária) - Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 2004.

CASSINI, Sérgio Túlio (Coord.). PROGRAMA DE PESQUISA EM SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL). **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento de biogás.** Vitória: ABES, 2003. 196 p.

CHEN, Yan *et al.* Reactor performance and bacterial pathogen removal in response to sludge retention time in a mesophilic anaerobic digester treating sewage sludge. **Bioresource technology**, v. 106, p. 20-26, 2012.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. **Reatores anaeróbios**. 2 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007. 380 p.

COELHO, Nuno Miguel Gabriel *et al.* Evaluation of continuous mesophilic, thermophilic and temperature phased anaerobic digestion of microwaved activated sludge. **Water research**, v. 45, p. 2822-2834, 2011.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução n. 375, de 29 de agosto de 2006**. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. 2006.

EUROPA. Comissão Européia de Meio Ambiente. **Diretiva 86/278/EEC**, de 12 de junho de 1986. Relativa à proteção do ambiente, e em especial os solos, na utilização agrícola de lodo de esgoto. 1986.

FLORIANÓPOLIS. Prefeitura Municipal de Florianópolis. **Plano Municipal Integrado de Saneamento Básico do Município de Florianópolis - SC**. Florianópolis, 2011. 299 p.

GANTZER, C. *et al.* Monitoring of bacterial and parasitological contamination during various treatment of sludge. **Water Research**, v. 35, n. 16, p. 3763-3770, 2001.

GONÇALVES, Ricardo Franci (Coord.). **Desinfecção de efluentes sanitários**. Rio de Janeiro: ABES; São Paulo, RiMa, 2003. 422 p.

HAYS, Bárbara D. Potential for parasitic disease transmission with land application of sewage plant effluents and sludges. **Water Research**, v. 11, p. 583-595, 1977.

HOSPIDO, Almudena *et al.* **Environmental assessment of anaerobically digested sludge reuse in agriculture: potential impacts of emergent micropollutants**. *Water research*, v. 44, p. 3225-3233, 2010.

IDEXX Laboratories. **Colilert**: Teste simples para coliformes e E. coli. Disponível em http://www.idexx.com/pubwebresources/pdf/en_us/water/64063001.pdf. Acesso em 12 de outubro de 2012.

JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSOA, Constantino Arruda 3. ed. **Tratamento de esgotos domésticos**. Rio de Janeiro: ABES. 1995. 683 p.

KUNZ, Jaques Muriel Oliveira *et al.* Parasitas intestinais em crianças de escola municipal de Florianópolis – SC – Educação ambiental e em saúde. **Revista Biotemas**, v. 21, p. 157-162, dez. 2008.

LEITE, Wanderli Rogério Moreira. **Digestão Anaeróbia Mesofílica de Lodo Adensado de Estação de Tratamento de Esgoto**. 2011. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

UDUVICE, Maurício. Experiência da Companhia de Saneamento do Distrito Federal na reciclagem agrícola de biossólido. In: BETTIOL, Wagner; CAMARGO, Otávio. A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA, Meio Ambiente, 2000. p. 153-162.

MALTA, Tatiana Siqueira. **Aplicação de lodos de estação de tratamento de esgotos na agricultura: estudo de caso no município Rio das Ostras – RJ**. 2001. 57 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Ambiental e Saúde Pública – Escola Nacional de Saúde Pública, Fundação Oswaldo Cruz, 2001.

MARQUEZI, Marina Chiarelli. **Comparação de metodologias para a estimativa do número mais provável (NMP) de coliformes em amostras de água**. 2010. 111 f. Dissertação (mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

MATESCO, Viviana Cauduro *et al.* Contaminação sazonal por ovos de helmintos na praia de Ipanema, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista de Patologia Tropical**, v. 35, p. 135-141, maio/ago. 2006.

MELO, W. J., & MARQUES, M. O. Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas. In: BETTIOL, Wagner; CAMARGO, Otávio. A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA, Meio Ambiente, 2000. p. 109-141.

METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2003. 1819 p.

MIKI, M. K. Tratamento da fase sólido em estações de tratamento de esgotos. In: TSUTIYA, Milton Tomoyuki *et al* (Ed.). **Biossólidos na agricultura**. 2. ed. São Paulo: ABES, 2002. p. 41-88.

NEW YORK. Department of Health of New York. Health and Safety in the Home, Workplace and Outdoors. **Coliform bacteria in drinking water**. Disponível em: http://www.health.ny.gov/environmental/water/drinking/coliform_bacteria.htm. 2012.

OGE, H.; OGE, S. Quantitative comparison of various methods for detecting eggs of *Toxocara canis* in samples of sand. **Veterinary Parasitology**, v. 92, p. 75-79, 2000.

OLIVEIRA FILHO, Abrahão Alves *et al*. Frequência de enteroparasitas nas areias das praias da Paraíba. **BioFar - Revista de biologia e Farmácia**, v. 6, n. 2, 2011.

OLIVEIRA, Edson Carlos Machado. **Desinfecção de efluentes sanitários tratados através da radiação ultravioleta**. 2003. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento. **Agenda 21 global**. Rio de Janeiro, 1992.

PAULINO, Rosangela C.; CASTRO, Edilene A.; THOMAZ-SOCCOL, Vanete. Tratamento anaeróbio de esgoto e sua eficiência na redução da viabilidade de ovos de helmintos. **Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical**, v. 34, p. 421-428, set./out. 2001.

PEGORINI, Eduardo Sabino. **Avaliação de impactos ambientais do programa de reciclagem agrícola de lodo de esgoto na região metropolitana de Curitiba**. 2002. 217 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

PIRES, A. M. **Uso Agrícola do lodo de esgoto: aspectos legais**. Jaguariúna: Agência Embrapa de Informação Tecnológica, 2006. 5 p.

RIAU, Víctor *et al*. Temperature-phased anaerobic digestion (TPAD) to obtain class A biosolids. A discontinuous study. **Bioresource technology**, v. 101, p. 65-70, 2010.

ROCHA, Silvana *et al.* Environmental analyses of the parasitic profile found in the sandy soil from the Santos municipality beaches, SP, Brasil. **Revista do Instituto de Medicina Tropical de São Paulo**, v. 53, p. 277-281, set./out. 2011.

SANTIAGO, Adriana Cavalcante; GAGLIANI, Luiz Henrique. Estudo da prevalência de enteroparasitas em areia de praia no município de São Vicente, SP, Brasil. **Revista UNILUS Ensino e Pesquisa**, v. 8, n. 15, jul./dez. 2011.

SILVA, J. E. Alternativa agrônômica para o biossólido: a experiência de Brasília. In: BETTIOL, Wagner; CAMARGO, Otávio. A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA, Meio Ambiente, 2000. p. 143-151.

SOBRINHO, P. A. Tratamento de esgoto e geração de lodo. TSUTIYA, Milton Tomoyuki *et al* (Ed.). **Biossólidos na agricultura**. 2. ed. São Paulo: ABES, 2002. p. 7-40.

SPINOSA, L.; VESILIND, P. A. **Sludge into biosolids: processing, disposal, utilization**. United Kingdom: IWA Publishing, 2001.

TAMIMI, Akrum H. *et al.* **Developing a Manual for Management of Sludge and Biosolids at Jordanian Wastewater Treatment Plants - A Technical report**. Tucson: University of Arizona, 2010.

TEIXEIRA, Camilo. **Higienização de lodo de estação de tratamento de esgoto por compostagem termofílica para uso agrícola**. 2012. 139 f. Dissertação (Mestre em Agroecossistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki *et al* (Ed.). **Biossólidos na agricultura**. 2. ed. São Paulo: ABES, 2002. 468 p.

UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMME - UN-HABITAT. **Global atlas of excreta, wastewater sludge and biosolids management: moving forward the sustainable and welcome uses of a global resource**. Nairobi, Kenya, 2008. 632 p.

UNITES STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Fecal coliform and Escherichia coli**. Disponível em <http://www.epa.gov/katrina/fecal.html>. Acesso em 30 de novembro de 2012.

UNITES STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge**. United States, 2003. 178 p.

VIEIRA, Glaucia Elisa Gama *et al.* O processo de pirólise como alternativa para o aproveitamento do potencial energético de lodo de esgoto – uma revisão. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 12, n. 17, p. 01-106, jan./jun. 2011.

VON SPERLING, Marcos. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 454 p.

WASHINGTON. Department of Health of Washington. Community and Environment. **Coliform bacteria in drinking water**. Disponível em: <http://www.doh.wa.gov/CommunityandEnvironment/DrinkingWater/Contaminants/Coliform.aspx>. Acesso em 02 de dezembro de 2012.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. **Integrated Guide to Sanitary Parasitology**. Jordan, 2004. 120 p.

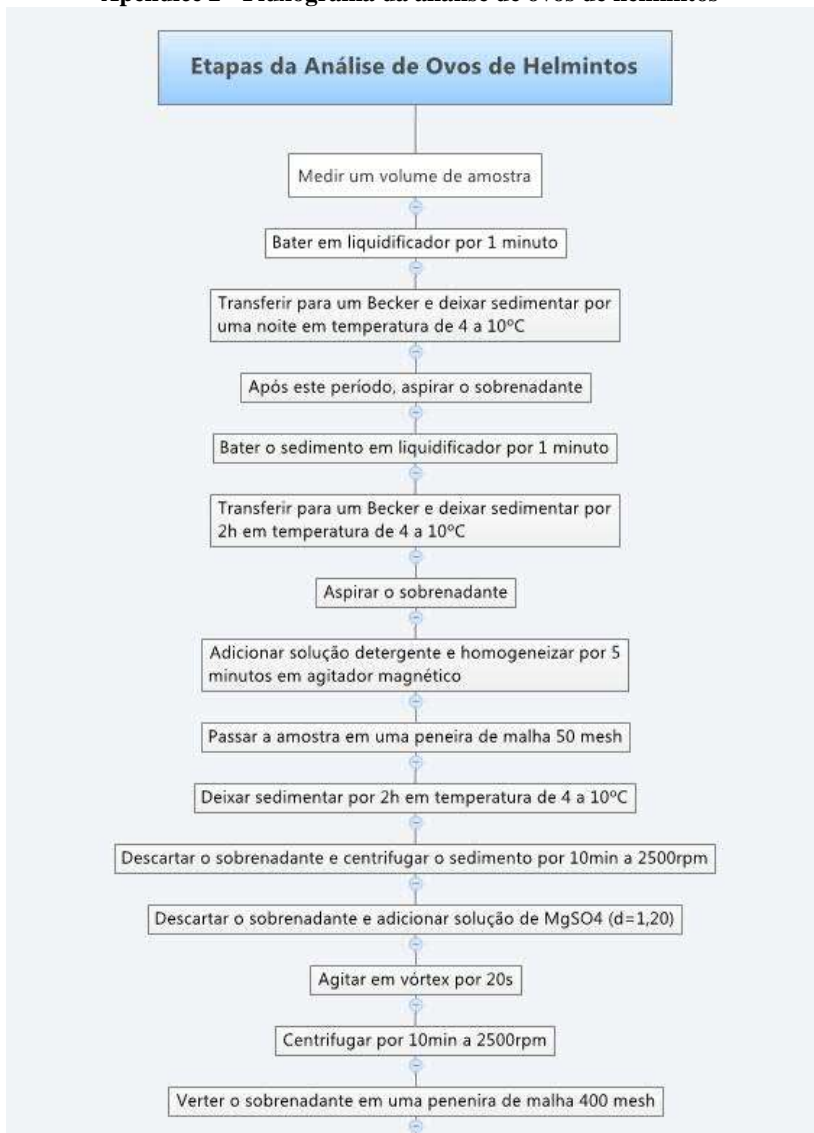
ZEITOUNI, Rafael de Freitas. **Análise crítica da norma CETESB P 4230 – “Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas – critérios para projeto e operação.”**. 2005. 267 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agrônômico de Campinas, Campinas, 2005.

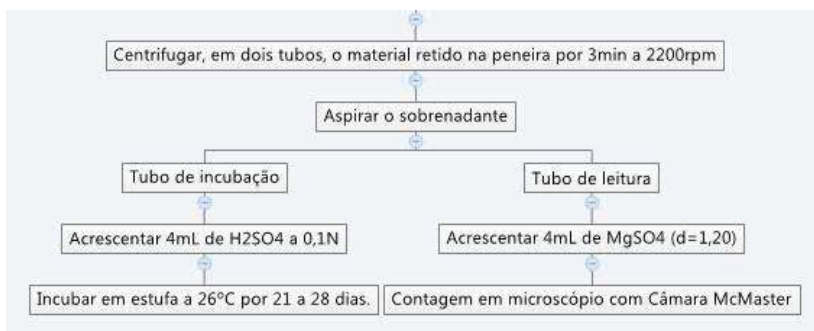
9 APÊNDICES

Apêndice 1 - Análises realizadas em função do dia de coleta

Data	Dias acumulados	Intervalo (dias)	Código da amostra	Análise
03/07/2012	1	0	1	ST, SV e Hel
10/07/2012	8	7	2	ST, SV e Hel
07/08/2012	36	28	3	ST, SV e Hel
14/08/2012	43	7	4	ST, SV e Hel
21/08/2012	50	7	5	ST, SV e Hel
28/08/2012	57	7	6	ST, SV e Hel
04/09/2012	64	7	7	ST, SV e Hel
11/09/2012	71	7	8	ST, SV e Hel
18/09/2012	78	7	9	ST, SV e Hel
25/09/2012	85	7	10	ST, SV e Hel
02/10/2012	92	7	11	ST, SV e Hel
08/10/2012	98	6	17	Col
09/10/2012	99	1	12	ST, SV e Hel
11/10/2012	101	2	20	Sal
16/10/2012	106	5	13	ST, SV e Hel
30/10/2012	120	14	14	ST, SV e Hel
06/11/2012	127	7	15	ST, SV e Hel
08/11/2012	129	2	18	Col
13/11/2012	134	5	16	ST, SV, Hel e Col
20/11/2012	141	7	19	Col
29/11/2012	150	9	21	Sal e MP

Apêndice 2 - Fluxograma da análise de ovos de helmintos





Apêndice 3 – Concentração e eficiência de remoção de microrganismos e SV obtidos a partir da digestão anaeróbia mesofílica em trabalhos científicos

Autor		Chen <i>et al.</i> (2012)	Chen <i>et al.</i> (2012)	Chen <i>et al.</i> (2012)	Bonjoch e Blanch (2009)	Astals <i>et al.</i> (2012)	Gantzer (2001)	WEF apud Andreoli (2001)**
Resíduo		lodo primário + ativado	lodo primário + ativado	lodo primário + ativado	lodo ativado	lodo primário + ativado	-	-
TDH (dias)		11	16	25	20	20	20	-
Temperatura (oC)		35	35	35	35	37	35-37	-
<i>Salmonella</i> (NMP/gST)	Lodo Bruto	1,8E+06	3,8E+05	3,5E+06	-	-	-	3 a 4,6E+04
	Lodo digerido	2,1E+04	4,2E+02	6,8E+02	-	-	-	3 a 62
	Eficiência (log)	0,91	1,87	2,30	-	-	-	-
Coliformes (NMP/gST)	Lodo Bruto	5,6E+06	3,2E+06	4,3E+06	3,2E+08	2,5E+06	-	1,4E+08 a E+09
	Lodo digerido	6,6E+04	3,4E+04	4,2E+04	2,6E+07	1,6E+04	1,3E+05	ND a 7,8E+06
	Eficiência (log)	1,93	2,98	3,01	1,5	2,1	1,5	-
Ovos de Helminto (ovos/gST)	Lodo Bruto	-	-	-	-	-	1,67*	20 a 700
	Lodo digerido	-	-	-	-	-	1,57*	30 a 70
	Eficiência (log)	-	-	-	-	-	0,03***	-
SV	redução (%)	22,6	19,5	19,6	-	40,6	-	-

*Ovos de helmintos da classe Nematoda (*Ascaris*, Ancilostomídeo). **Concentração em número/100mL. ***Calculado.